

# DOSSIER DE CANDIDATURE AU DIPLOME D'HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

Présenté par

**Benoît Bertrand**

RESISTANCE DES PLANTES AUX BIO-AGRESSEURS

(UMR IRD-CIRAD-UMII, Directeur M. Nicole)

Campus IRD, 911 avenue Agropolis BP 64501

34394 Montpellier cedex 5

à l'ECOLE DOCTORALE S.I.B.AG.H.E

Systemes Intégrés en Biologie, Agronomie, Géosciences, Hydrosociences, Environnement

Sur le thème

**HETEROSIS ET VARIETES HYBRIDES CHEZ UN  
ALLOTETRAPLOÏDE PERENNE (*COFFEA ARABICA*).**

## AVANT PROPOS

Ce rapport est consacré à la synthèse de ma carrière de chercheur et à mon projet de recherches pour les prochaines années.

Ma carrière s'est déroulée au CIRAD dans l'amélioration des Plantes et plus précisément dans le domaine de la science de la création et de la sélection de variétés.

Il s'agit d'un domaine scientifique actuellement plus proche des sciences de l'ingénieur que de la recherche en biologie avancée. La théorie de la sélection des Plantes s'appuie en effet sur la génétique quantitative dont les bases ont été définies aux environs de 1920 par les travaux de Wright (1922) ou de Fisher (1930). Des milliers de travaux ont suivis dans le domaine de la sélection animale et des plantes et ont abouti à des ouvrages presque définitifs sur l'art et la manière de sélectionner de nouvelles variétés (Falconer, 1981 ; Gallais, 1990, etc...). Après avoir beaucoup investi dans ce domaine la recherche publique s'en est désengagée dans les années 90. Il ne faut donc pas s'étonner si cette spécialité est moins enseignée de nos jours dans les Universités ou les écoles d'agronomie. La création de variétés est aujourd'hui essentiellement du domaine du secteur privé et de plus en plus souvent dans les mains de très grands groupes multinationaux.

Pour mon Institut de Recherches publique l'amélioration variétale reste pourtant un sujet d'actualités. Le CIRAD est en effet confronté entre autres choses à des problématiques de développement de filières agricoles et il apparaît presque toujours que malgré leur grande importance économique ou socio-économique, ces filières tropicales n'ont pas généré d'industrie de semences significatives. Cette absence n'est pas toujours perçue à son juste coût par les producteurs et les Etats. Pourtant elle induit des pratiques aléatoires génératrices de sous-développements. Chez beaucoup de plantes tropicales les vergers sont constitués d'écotypes non sélectionnés ou de variétés 'historiques' dont la base génétique très étroite -qui reflète souvent l'histoire coloniale de la culture- constitue une grave faiblesse face à des menaces phytoparasitaires. C'est ainsi que le verger des cacaoyers d'Afrique de l'Ouest -la principale région de production mondiale- est essentiellement constitué de la variété 'Amelonado', issue d'une base génétique très étroite. De la même façon, le verger d'Arabica d'Amérique Latine est constitué à plus de 80% par des variétés issues d'une base génétique historique très étroite qui date du 18<sup>ème</sup> siècle. Dans d'autres cas, c'est la mauvaise utilisation ou l'absence d'utilisation raisonnée de la diversité génétique qui entrave le développement des filières. L'absence de progrès génétique ne permet pas d'augmenter les rendements et par là même contraint à des cultures extensives qui ne cessent d'empiéter sur les fronts pionniers au détriment des espaces vierges et de leur biodiversité.

Le besoin d'un progrès génétique chez de nombreuses plantes tropicales est pourtant de plus en plus pressant. Le monde tropical est sujet à des mutations profondes et extrêmement rapides. Il s'y installe de nouvelles équations explosives en termes de besoins alimentaires, de besoins de terre et de rareté économique (Griffon, 2010). Pour l'agriculture, il est important de générer de nouvelles technologies qui permettent une intensification écologique. L'amélioration des Plantes a-t-elle des solutions à apporter ? Hier encore célébrée pour ses succès éclatants lors de la Révolution Verte, elle est aujourd'hui vilipendée par des détracteurs de tous horizons. Une opinion de plus en plus répandue y compris chez de nombreux scientifiques est d'y voir d'abord et surtout une manipulation du vivant et/ou une appropriation des ressources génétiques au bénéfice exclusif d'un petit nombre contre la majorité des petits producteurs.

La conviction profonde du CIRAD est que la science de la sélection des variétés a toute sa place dans la boîte à outils qu'il nous faut utiliser pour réinventer les agricultures et que c'est même un outil particulièrement puissant au service d'un développement durable et équitable, s'il s'appuie sur une bonne ingénierie et un code de bonnes conduites respectueux des producteurs et de l'environnement.

Dans la boîte à outils du sélectionneur, les variétés 'hybrides' sont souvent celles qui sont proposées pour assurer le progrès génétique maximum. Ce type de variété utilise le phénomène d'hétérosis. Le sujet de l'hétérosis a été abondamment étudié avec beaucoup de moyens et de profondeur chez des plantes allogames de grande portée agronomique comme le maïs ou plantes modèles comme *Arabidopsis thaliana*.

Peu de chercheurs l'ont abordé chez le caféier. La voie hybride chez l'Arabica mérite pourtant que l'on s'y intéresse en profondeur car l'espèce est pérenne, autogame et allopolyploïde. Il ne s'agit donc pas *a priori* de la structure optimale pour recommander la voie hybride par rapport à la voie lignée. Comme le souligne Gallais (2009) les plantes allopolyploïdes, souvent autogames, sont moins sensibles à la consanguinité et manifestent moins d'hétérosis, car la duplication de leur génome a permis de fixer une part importante de l'hétérosis : des effets de dominance, liés à l'état hétérozygote sont transformés en effets d'épistasie fixés à l'état homozygote (Gallais, 2009).

C'est pourtant sur cette plante allopolyploïde que j'ai travaillé depuis plus de 20 ans, en mettant en évidence des manifestations importantes d'hétérosis et les modalités d'application de la voie hybride. Il faut souligner que les travaux présentés ici, ont été réalisés à l'usage d'une filière dans laquelle l'usage social de la science et de ses innovations ne va pas de soi. Au fur et à mesure de l'avancée de mes travaux, je me suis rendu compte que vouloir introduire des 'variétés hybrides' dans un verger basé uniquement sur des variétés lignées plus ou moins homozygotes, c'est forcément aborder une dimension socio-économique importante, puisque l'adoption de ces nouvelles variétés oblige l'agriculteur à abandonner les pratiques d'autoapprovisionnement en semences. C'est aussi ouvrir la porte à des stratégies commerciales de rupture fondées sur de nouvelles variétés produisant des cafés différents des standards industriels. C'est finalement être amené à envisager les nouvelles variétés comme des innovations écologiques utilisables au bénéfice de systèmes de production écologiquement intensifs ou l'inverse, c'est-à-dire à l'usage de systèmes de production artificialisés.

Il y a 20 ans, j'ai été affecté au Costa Rica pour tester la mise en œuvre d'un schéma de création variétale basée sur la voie hybride chez *Coffea arabica*, - schéma naît des propositions de trois chercheurs André Charrier, Raoul Muller et Albertus Eskes-. C'est l'histoire de la naissance et de la preuve du concept d'une innovation que je raconte dans ce mémoire. La première partie, traite de ma vision du contexte socio-économique de la caféiculture et des contraintes auxquelles l'amélioration variétale doit faire face. La deuxième partie est consacrée à la mesure de l'hétérosis et au développement et à l'utilisation des variétés hybrides de café. Ce qui représente l'essentiel de mes travaux.

La troisième partie porte sur le projet de recherches que je mène et compte poursuivre sur l'hétérosis chez l'Arabica. En effet après avoir consacré beaucoup d'énergie pour convaincre la filière de l'utilité de la voie hybride il est temps d'approfondir les bases génétiques et épigénétiques du phénomène de l'hétérosis chez l'Arabica.

Les qualités et les défauts requis pour le chercheur -placé dans un contexte complexe et mouvant d'une filière agricole comme le café et dans le cadre nécessairement contraint d'un programme de sélection variétale de longue durée-, sont de faire preuve de constance, au risque de parfois lasser ses supérieurs mais aussi parfois d'improvisation, au risque de les surprendre. Je retiendrai de ces années que s'il est vrai que '*En avant calme et droit*' est la devise à laquelle il faut se tenir tous les jours pour mener à bien l'ingénierie d'un programme d'amélioration, '*la démarche hasardeuse est consubstantielle à la marche*', est l'autre devise à laquelle il faut souvent se raccrocher pour venir à bout des difficultés financières, administratives voire diplomatiques rencontrées en chemin. : la flexibilité et la ténacité sont à mon avis les qualités nécessaires du sélectionneur.

Au travers de ce document, j'ai essayé de donner un tableau d'ensemble d'une démarche orientée mais mouvante. J'espère que le lecteur saura en apprécier les tours et les détours.

## REMERCIEMENTS

Il n'est pas possible de remercier nominativement toutes les personnes ayant contribué à la rédaction de ce mémoire d'HDR, puisqu'il retrace plus de 20 années de travail collaboratif.

Aussi, j'adresse globalement ma reconnaissance et mes remerciements les plus sincères à toutes ces personnes, avec une mention particulière à mes collègues les plus proches de l'équipe DIVA et particulièrement à Christophe Montagnon, Luc Villain, Frédéric Georget, Marie-christine Combes, François Anthony, Eveline Dechamp, Isabelle Jourdan, Isabelle Hérault. Merci également à deux collègues d'une équipe proche, Stéphane Dussert et Thierry Joet.

Je remercie très sincèrement mon cher collègue Hervé Etienne, compagnon de route qui a partagé les moments de doute et les succès qui ont jalonné le développement des nouvelles variétés et leurs méthodes de propagation.

Tous mes remerciements les plus sincères à Philippe Lashermes avec qui je partage la vision stratégique de l'amélioration de l'arabica et des caféiers et à Michel Nicole que j'essaie d'épauler dans la gestion mouvementée de l'UMR.

J'adresse également mes remerciements les plus chaleureux à mes collègues Nicaraguayens et Mexicains avec lesquels nous avons développé des laboratoires, des champs semenciers et des réseaux d'essais chez les producteurs.

Je n'oublie pas les travailleurs au Costa Rica et au Nicaragua qui ont participé et participent au programme d'amélioration (et particulièrement à Walter, Vigirta, Martin).

Merci à Teddy Estève et à Clément et Eric Ponçon qui ont fait confiance au CIRAD pour transférer les technologies et des nouvelles variétés au Nicaragua dans leur entreprise. Il y fallait de la témérité.

Je tiens à remercier aussi ceux qui m'ont accompagné dans les débuts du programme d'hybridation : André Charrier, Albertus Eskes et Raoul Muller et ceux qui ayant perçu dans ce programme des potentialités ont aidé à trouver les fonds nécessaires et des mécanismes de valorisation, Dominique Berry, Jacques Meunier et Daniel Barthélémy.

## SOMMAIRE

<b>AVANT PROPOS.....</b>	<b>2</b>
REMERCIEMENTS.....	4
SOMMAIRE.....	5
<b>CURRICULUM VITAE .....</b>	<b>7</b>
Formation initiale.....	7
Déroulement de carrière au CIRAD .....	7
Propriété Intellectuelle .....	8
Affiliation à des associations professionnelles & organisation de congrès .....	8
Principaux projets 2003-2011.....	8
<b>ACTIVITES D’ENCADREMENT DE RECHERCHE .....</b>	<b>9</b>
Encadrement de thèses .....	9
Encadrement de Post-Doc (recents) .....	9
Encadrement d’étudiants (récents depuis 2006) .....	9
Encadrement d’étudiants (DE 1985 à 2006) .....	10
Encadrements recents ayant donné lieu à des publications.....	10
<b>ACTIVITES DE RESPONSABILITES COLLECTIVES.....</b>	<b>12</b>
<b>PUBLICATIONS ET TRAVAUX.....</b>	<b>13</b>
Articles a comite de lecture et a facteur d’impact .....	13
Ouvrages et chapitres d’ouvrages.....	17
Actes et communications a congrès.....	18
<b>PARTIE 1. VISION DE L’AUTEUR SUR LA SELECTION VARIETALE DE L’ARABICA EN AMERIQUE LATINE .....</b>	<b>24</b>
Rappel du contexte socio-economique.....	24
Les varietes disponibles .....	26
PREMIERE VAGUE: 1930-1980/ DES VARIETES ADAPTEES A UN SYSTEME MODERNE DE CULTURE INTENSIF .....	27
DEUXIEME VAGUE: 1970-2000/DES VARIETES RESISTANTES AUX MALADIES.....	30
TROISIEME VAGUE: 1990-2010/ DE NOUVELLES VARIETES POUR UNE AGRICULTURE ECOLOGIQUEMENT INTENSIVE. ....	31
LES CONDITIONS DE DIFFUSION DU PROGRES GENETIQUE .....	32

LA RECHERCHE EN GENETIQUE ET EN GENOMIQUE ET LES PROGRAMMES DE CREATION VARIETALE .....	33
<b>PARTIE 2: MISE EN EVIDENCE DE L'HETEROSIS &amp; DEVELOPPEMENT DES VARIETES HYBRIDES D'ARABICA (TRAVAUX DE RECHERCHE DE 1990-2010).....</b>	<b>35</b>
RAPPEL DES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DE L'ESPECE .....	35
L'HETEROSIS CHEZ L'ARABICA .....	40
Groupes hétérotiques.....	40
Nature de l'hétérosis .....	41
Hétérozygotie et fertilité : un inconvénient des hybrides.....	42
Résistance aux bioagresseurs des hybrides F1 d'Arabica.....	43
Qualité du breuvage des hybrides F1.....	46
Hétérosis et homéostasie en milieux paysans.....	50
Autres arguments en faveur des hybrides F1 .....	51
La production de semences hybrides.....	52
Comment poursuivre la creation d'hybrides F1 .....	54
Financer les programmes de recherche.....	59
<b>PARTIE 3 :PROJET DE RECHERCHE : BASES GENETIQUES ET MOLECULAIRES ET PREDICTIONDE L'HETEROSIS CHEZ L'ARABICA .....</b>	<b>60</b>
Preamble au projet de recherche .....	60
Enjeux et partenaires du projet de recherche.....	63
Revue bibliographique .....	64
Questions de recherches .....	65
<b>LISTE DES 10 ARTICLES LES PLUS IMPORTANTS .....</b>	<b>67</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE DU MEMOIRE .....</b>	<b>68</b>

## CURRICULUM VITAE

**Benoît BERTRAND CIRAD, UMR RPB**

né le 08 Avril 1959 à Rochefort s/mer (Charente-Maritime)

**Situation administrative** : Chercheur au CIRAD

**Adresse** : UMR RPB (IRD CIRAD UM2)

911 Avenue Agropolis ; BP 64501 F- 34394 MONTPELLIER Cedex 5

Tel 04 67 41 62 73 ; Fax 33(0)467416283 ; benoit.bertrand @cirad.fr

**Situation familiale** : Marié, 3 enfants

**Profession** :Généticien/sélectionneur

**Fonctions actuelles** :Directeur adjoint de l'UMR RPB

Correspondant de la filière café au CIRAD

Chercheur

## FORMATION INITIALE

---

1978-1982 : Ingénieur de l'Institut Technique d'Outre-Mer (ISTOM)

1985-1986 : DEA Amélioration des Plantes de SupAgro/Université de Montpellier (UM2)

1999-2002 : Doctorat de l'Université de Montpellier (UM2) et de l'ENSAM, Ecole doctorale Biologie des Systèmes intégrés, Agronomie et Développement.

## DEROULEMENT DE CARRIERE AU CIRAD

---

1983-1985 VSN, puis sélectionneur au centre de multiplication des cacaoyers du Gabon

1985-1991 Togo, chercheur en amélioration du cacaoyer et des caféiers, directeur adjoint puis directeur de l'Institut de Recherches sur le café et le cacao du Togo.

1991-2003 Costa Rica, chercheur en amélioration et génétique du caféier, responsable réseau régional de recherche en amélioration génétique du caféier, correspondant du CIRAD en Amérique Centrale.

2003-2011 Montpellier, chercheur en amélioration et génétique du caféier, directeur-adjoint de l'UMR RPB, correspondant filière café du CIRAD.

## PROPRIETE INTELLECTUELLE

---

Certificats d'obtention variétale (COV) déposés pour deux variétés d'Arabica au Mexique (Variété 'Marsellesa' et variété 'StarMaya').

Brevet d'un nouveau Bioréacteur MATIS®

## AFFILIATION A DES ASSOCIATIONS PROFESSIONNELLES & ORGANISATION DE CONGRES

---

Membre du bureau de l'ASIC (association for science and Information on Coffee, Lausanne, Switzerland, [coffee-science@asic-cafe.org](mailto:coffee-science@asic-cafe.org))

Organisation des congrès bi-annuels de l'ASIC à Bali en 2010 ; au Costa Rica en 2012.

Membre de l'ICGN 'International Coffee Genomic Network'.

## PRINCIPAUX PROJETS 2003-2011

---

### a) Projets de recherches ANR et Union européenne récents

Type de projet et organisation donatrice	Titre du projet	Nom du coordinateur	Début et fin de projet	Nombre de Personne mois (B. Bertrand)
ANR Génomique et Biotechnologies végétales	EmbryoCoffee	Hervé Etienne	Soumis en 2011	9
ANR Génomique	CoffeaSeq	P. Wincker	2010-2011	2
ANR Génomique et Biotechnologies végétales	GnpAsso	D. Steinback	2011-2012	1
ANR Génomique et Biotechnologies végétales	PUCE CAFE	B.Bertrand	2006-2009	18
Projet (U.E) STD3	CBDRESIST	B.Bertrand	2003-2006	12

### b) Projets de partenariat public/privé récents

Type de projet et organisation donatrice	Titre du projet	Nom du coordinateur	Début et fin de projet	Nombre de Personne mois (B. Bertrand)
ECOM (groupe privé)	Transfert de technologie et Création variétale conjointe	Benoît Bertrand	Débuté en 2003 (toujours en cours)	18



## ACTIVITES D'ENCADREMENT DE RECHERCHE

### ENCADREMENT DE THESES

---

**BARDIL Amélie** 2008-2011 CIRAD / Ecole Doctorale 167

La régulation génétique chez une espèce allotétraploïde (*Coffea arabica*) : contributions à la diversité génétique et à l'adaptation de l'espèce.

### PARTICIPATION A L'ENCADREMENT DE THESES

**GICHURU Eliza** 2003-2007 BST-IRD & CRF (Kenya)

Etude génétique et moléculaire d'une source de résistance à l'anthracnose des baies chez le caféier (*Coffea arabica*).

**ALPIZAR Edgardo** 2004-2006 ENSA-M / Ecole Doctorale 167

Analyse des bases physiologiques et génétique de la résistance au nématode *Meloidogyne exigua* chez le caféier (*Coffea arabica*)

**LOUREIRO Ana** 2004-2008 CIFC-IICT (Portugal)

Histological and ultrastructural characterization of coffee resistance to *Colletotrichum kahawae*.

### ENCADREMENT DE POST-DOC (RECENTS)

---

**DANTEC Juliana**. 2010-2012. EMBRAPA (Brésil) Identified a set of genes that show evidence of having large effects on the phenotypes and needed to resist to heat

**GETU Bekele**. 2008. Rothamstead International African Fellowship & EIAR (Ethiopie) Caractérisation de la diversité génétique et biochimique d'une collection de caféiers d'Ethiopie.

**VILLAREAL Diana**. 2005-2006. Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural de Colombie & CENICAFE (Colombie) Lipid analysis of coffee beans from different genotypes and localities and its relationship to coffee quality, aroma and flavor.

**POSADA Huver**. 2004. Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural de Colombie & CENICAFE (Colombie) Application de la Spectrométrie Proche Infrarouge pour l'amélioration génétique de la qualité du café. Stabilité et héritabilité de la signature proche-infrarouge.

**MENENDEZ YUFFA Andrea**. 2007. Université du Venezuela, Institut de Biologie. A comparative analysis of the development and quality of nursery plants derived from somatic embryogenesis and from seedlings for large-scale propagation of coffee

### ENCADREMENT D'ETUDIANTS (RECENTS DEPUIS 2006)

---

**REIG Claire**. 2011. Licence. The variation of the fatty acid membrane composition of leaf membranes of the natural allopolyploid (*Coffea arabica*) reflected a better plasticity for temperature than its two diploid species

**MORO** Alessio. 2010 . Stage ingénieur ENSIAA (Nancy ) : *Peut-on discriminer des variétés de café suivant des catégories sensorielles ? Une première approche*

**EVIEUX** Yasmine. 2009. Stage de 2<sup>ème</sup> année de SupAgro Montpellier . utilisation de la spectroscopie proche-infrarouge pour la chimiotaxonomie des caféiers.

**DURAND** Noël. 2007. **Université Montpellier II, MasterPro** Résistance induite du caféier à l'antracnose des fruits.

**SAINZELLE** Julien. 2006. **Université Montpellier II, MasterPro de Biotraçabilité, biodetection et biodiversité** Utilisation de la spectrométrie proche-infra-rouge pour l'authentification des caféiers.

**FERRAND** Marion. 2005. **ENSA-R** Application de la Spectrométrie Proche Infrarouge pour l'amélioration génétique de la qualité du café.

### ENCADREMENT D'ETUDIANTS (DE 1985 A 2006)

Encadrement d'une quinzaine de stagiaires niveau licence ou Masters de 1990 à 2005.

### ENCADREMENTS RECENTS AYANT DONNE LIEU A DES PUBLICATIONS

(les noms des étudiants encadrés sont indiqués en caractères gras)

Nom des étudiants	Publications
<b>Bardil</b> (Thèse UM2)	<p><b>Bardil A</b>, Dantas de Almeida J., Combes M.C., Lashermes P., Bertrand B. 2011. Genomic expression dominance in the natural allopolyploid <i>Coffea arabica</i> is massively affected by growth temperature. <i>New Phytologist</i>, in press.</p> <p>Privat I., <b>Bardil A.</b>, Bombarely Gomez A., Severac D., Dantec C., Fuentes I., Mueller L., Joët T., Pot D., Foucrier S., Dussert S., Leroy T., Journot L., De Kochko A., Campa C., Combes M.C., Lashermes P., Bertrand B. 2011. The 'PUCE CAFE' project: The first 15K coffee microarray, a new tool for discovering candidate genes correlated to agronomic and quality traits. <i>BMC Genomics</i>, <b>12</b> (5).[20110207]. <a href="http://dx.doi.org/10.1186/1471-2164-12-5">http://dx.doi.org/10.1186/1471-2164-12-5</a></p> <p><b>Bardil A</b>, Combes M.C., Lashermes P., Bertrand B. 2010. Gene expression divergences between the allopolyploid coffee arabica and its diploids relatives appear environment-dependant : [Abstract]. In : <i>Abstracts of Plant and Animal Genomes XVIIIth Conference, San Diego, CA (USA), January 09-13, 2010</i>. [Online]. [S.l.] : s.n.. Plant and Animal Genomes Conference. 18, 2010-01-09/2010-01-13, San Diego, Etats-Unis.[20100720]. <a href="http://www.intl-pag.org/18/abstracts/W20_PAGXVIII_157.html">http://www.intl-pag.org/18/abstracts/W20_PAGXVIII_157.html</a></p>
<b>Loureiro</b> (Thèse Portugal)	<p><b>Loureiro A.A.</b>, Silva M.D.C., Varzea V., Moncada P., Bertrand B., Nicole M. 2008. Histological and ultrastructural characterization of coffee resistance to <i>Colletotrichum kahawae</i> : [PB659]. In : <i>22nd International Conference on Coffee Science</i>. [Cd-Rom]. Montpellier : ASIC, p. 1040-1044. International Conference on Coffee Science. 22, 2008-09-14/2008-09-19, Campinas, Brésil.</p>
<b>Gichuru</b> (Thèse Kenya)	<p><b>Gichuru E.K.</b>, Agwanda C.O., Combes M.C., Mutitu E.W., Ngugi E.C.K., Bertrand B., Lashermes P. 2008. Identification of molecular markers linked to a gene conferring resistance to coffee berry disease (<i>Colletotrichum kahawae</i>) in <i>Coffea arabica</i>.</p>

	<i>Plant pathology</i> , 57 (6) : 1117-1124.
<b>Alpizar</b> (Thèse UM2)	<p><b>Alpizar E.</b>, Dechamp E., Lapeyre-Montes F., Guilhaumon C., Bertrand B., Jourdan C., Lashermes P., Etienne H. 2008. <i>Agrobacterium rhizogenes</i>-transformed roots of Coffee (<i>Coffea arabica</i>): Conditions for long-term proliferation, and morphological and molecular characterization. <i>Annals of botany</i>, 101 (7) : 929-940.</p> <p><b>Alpizar E.</b>, Etienne H., Bertrand B. 2007. Intermediate resistance to <i>Meloidogyne exigua</i> root-knot nematode in <i>Coffea arabica</i>. <i>Crop Protection</i>, 26 (7) : 903-910.</p> <p><b>Alpizar E.</b>, Dechamp E., Espeout S., Royer M., Lecouls A.C., Nicole M., Bertrand B., Lashermes P., Etienne H. 2006. Efficient production of <i>Agrobacterium rhizogenes</i>-transformed roots and composite plants for studying gene expression in coffee roots. <i>Plant cell reports</i>, 25 : 959-967.</p> <p>Bertrand B., Vaast P., <b>Alpizar E.</b>, Etienne H., Davrieux F., Charmetant P. 2006. Comparison of bean biochemical composition and beverage quality of arabica hybrids involving Sudanese-Ethiopian origins with traditional varieties at various elevations in Central America. <i>Tree physiology</i>, 26 (9) : 1239-1248.</p> <p>Bertrand B., <b>Alpizar E.</b>, Lara L., SantaCreo R., • Hidalgo M., Quijano J.M., Montagnon C., Georget F., Etienne H. 2011. Performance of <i>Coffea arabica</i> F1 hybrids in agroforestry and full-sun cropping systems in comparison with American pure line cultivars <i>Euphytica</i> DOI 10.1007/s10681-011-0372-7</p>
<b>Getu</b> (Master)	<p><b>Getu B.</b>, Bayetta B., Habtamu Z., Labouisse J.P., Davrieux F., Bertrand B. 2008. Stability of sensorial and biochemical traits of different geographical origin ethiopian arabica coffee (<i>Coffea arabica</i> L.) accessions under three contrasting environmental conditions. In : <i>22nd International Conference on Coffee Science</i>. [Cd-Rom]. Montpellier : ASIC, p. 604-607. International Conference on Coffee Science. 22, 2008-09-14/2008-09-19, Campinas, Brésil.</p>
<b>Villarreal</b> (Post-doc)	<p><b>Villarreal D.</b>, Laffargue A., Posada H., Bertrand B., Lashermes P., Dussert S. 2009. Genotypic and environmental effects on coffee (<i>Coffea arabica</i> L.) bean fatty acid profile: Impact on variety and origin chemometric determination. <i>Journal of agricultural and food chemistry</i>, 57 (23) : 11321-11327.</p> <p>Bertrand B., <b>Villarreal D.</b>, Laffargue A., Posada H., Lashermes P., Dussert S. 2008. Comparison of the effectiveness of fatty acids, chlorogenic acids, and elements for the chemometric discrimination of coffee (<i>Coffea arabica</i> L.) varieties and growing origins. <i>Journal of agricultural and food chemistry</i>, 56 (6) : 2273-2280.</p>
<b>Posada</b> (Post-doc)	<p><b>Posada H.</b>, Ferrand M., Davrieux F., Lashermes P., Bertrand B. 2009. Stability across environments of the coffee variety near infrared spectral signature. <i>Heredity</i>, 102 (2) : 113-119</p> <p><b>Posada H.</b>, Ferrand M., Davrieux F., Lashermes P., Bertrand B. 2008. Near infrared spectral signature and their stability across environments : [C312]. In : <i>22nd International Conference on Coffee Science</i>. [Cd-Rom]. Montpellier : ASIC, p. 438-447. International Conference on Coffee Science. 22, 2008-09-14/2008-09-19, Campinas, Brésil.</p>
<b>Ferrand</b> (Master Ensar)	<p>Posada H., <b>Ferrand M.</b>, Davrieux F., Lashermes P., Bertrand B. 2009. Stability across environments of the coffee variety near infrared spectral signature.</p>

	<p><i>Heredity</i>, 102 (2) : 113-119</p> <p>Posada H., <b>Ferrand M.</b>, Davrieux F., Lashermes P., Bertrand B. 2008. Near infrared spectral signature and their stability across environments : [C312]. In : <i>22nd International Conference on Coffee Science</i>. [Cd-Rom]. Montpellier : ASIC, p. 438-447. International Conference on Coffee Science. 22, 2008-09-14/2008-09-19, Campinas, Brésil.</p>
<b>Durand</b> (Master UM2)	<p><b>Durand N.</b>, Bertrand B., Guyot B., Guiraud J.P., Fontana-Tachon A. 2009. Study on the <i>Coffea arabica</i> / <i>Colletotrichum kahawae</i> pathosystem: Impact of a biological plant protection product = Untersuchungen am Wirt-Pathogen-System <i>Coffea arabica</i>/<i>Colletotrichum kahawae</i>: Wirkungseffizienz eines biologischen Pflanzenschutzprodukts. <i>Journal of plant diseases and protection</i>, 116 (2) : 78-85.</p> <p><b>Durand N.</b>, Bertrand B., Guyot B., Guiraud J.P., Fontana-Tachon A. 2008. Study on the <i>Coffea arabica</i>/<i>Colletotrichum kahawae</i> pathosystem. Impact of a Natural Elicitor (FEN 560) on this pathosystem : [PA597]. In : <i>22nd International Conference on Coffee Science</i>. [Cd-Rom]. Montpellier : ASIC, p. 1563-1567. International Conference on Coffee Science. 22, 2008-09-14/2008-09-19, Campinas, Brésil.</p>
<b>Menendez-Yuffa</b> (Post Doc)	<p><b>Menendez-Yuffa A.</b>, Barry-Etienne D., Bertrand B., Georget F., Etienne H. 2010. A comparative analysis of the development and quality of nursery plants derived from somatic embryogenesis and from seedlings for large-scale propagation of coffee (<i>Coffea arabica</i> L.). <i>Plant cell, tissue and organ culture</i>, 102 (3) : 297-307.</p> <p><b>Menendez-Yuffa A.</b>, Bertrand B., Georget F., Jourdan I., Lashermes P., Malo E., Montagnon C., Santoni S., Tollon C., Etienne H. 2010. Microsatellite polymorphism in hybrids of <i>Coffea arabica</i> (L.) produced industrially by somatic embryogenesis : [Abstract]. In : IAPB. <i>12th IAPB Congress. Sustainability through agricultural biotechnology : food, biomaterials, energy and environment, June 6-11, 2010, Saint Louis, Missouri, USA</i>. s.l. : s.n., 1 p. IAPB Congress. 12, 2010-06-06/2010-06-11, Saint Louis, Etats-Unis.</p>

## ACTIVITES DE RESPONSABILITES COLLECTIVES

Au cours de ma carrière j'ai exercé les fonctions de Directeur d'un centre de recherches au Togo avec plus de 200 employés.

J'ai coordonné plusieurs projets avec des budgets conséquents (Banque Mondiale, Union Européenne ANR) et j'ai coordonné un réseau scientifique pour l'amélioration du caféier arabica en Amérique Centrale.

Actuellement j'exerce la fonction de directeur-adjoint de l'UMR RPB et je suis responsable des agents du CIRAD (12) et de leur budget au sein de cette UMR.

Je coordonne un partenariat Public/Privé entre le CIRAD et une entreprise internationale (ECOMTRADING) pour la diffusion des hybrides F1 que j'ai créé et sélectionné.

J'encadre des étudiants et donc des cours à l'université (8h/an) en licence Pro, Master 1 et 2 'Phytopathologie tropicale de l'UM2

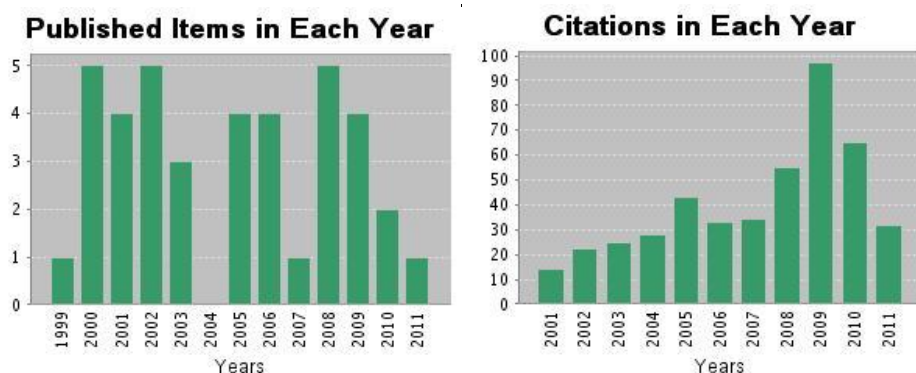
## PUBLICATIONS ET TRAVAUX

54 articles à comité de lecture et 10 chapitres de livres.

10 articles depuis la demande d'accréditation en 2008.

H-index calculé par ISI WEB of Knowledge: 12

H-index calculé par Publish or Perish : 17



## ARTICLES A COMITE DE LECTURE ET A FACTEUR D'IMPACT

*Certaines références bibliographiques de l'auteur sont rappelées dans les figures 12 à 28.*

**Bardil A., Dantas de Almeida J., Combes M.C., Lashermes P., Bertrand B.** 2011. Genomic expression dominance in the natural allopolyploid *Coffea arabica* is massively affected by growth temperature. *New Phytologist*, in press.

**Ribas A., Dechamp E., Champion A., Bertrand B., Combes M.C., Verdeil J.L., Lapeyre F., Lashermes P., Etienne H.** 2011. Agrobacterium-mediated genetic transformation of *Coffea arabica* (L.) is greatly enhanced by using established embryogenic callus cultures. *BMC Plant Biology*, 11:92

**Bertrand B., Alpizar E., Lara L., SantaCreo R, Hidalgo M., Quijano J.M., Montagnon C., Georget F., Etienne H.** 2011. Performance of *Coffea arabica* F1 hybrids in agroforestry and full-sun cropping systems in comparison with American pure line cultivars. *Euphytica*, DOI 10.1007/s10681-011-0372-7

**Privat I., Bardil, Bombarely Gomez A., Severac D., Dantec C., Fuentes I., Mueller L., Joët T., Pot D., Foucrier S., Dussert S., Leroy T., Journot L., De Kochko A., Campa C., Combes M.C., Lashermes P., Bertrand B.** 2011. The 'PUCE CAFE' project: The first 15K coffee microarray, a new tool for discovering candidate genes correlated to agronomic and quality traits. *BMC Genomics*, 12 (5).[20110207]. <http://dx.doi.org/10.1186/1471-2164-12-5>

**Joët T., Laffargue A., Descroix F., Doubeau S., Bertrand B., De Kochko A., Dussert S.** 2010. Influence of environmental factors, wet processing and their interactions on the biochemical composition of green Arabica coffee beans. *Food chemistry*, 118 (3) : 693-701.[20091002]. [Http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.05.048](http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.05.048)

**Menendez-Yuffa A., Barry-Etienne D., Bertrand B., Georget F., Etienne H.** 2010. A comparative analysis of the development and quality of nursery plants derived from somatic embryogenesis and from seedlings for large-scale propagation of coffee (*Coffea arabica* L.). *Plant cell, tissue and organ culture*, 102 (3) : 297-307.[20100913]. <http://dx.doi.org/10.1007/s11240-010-9734-4>

- Durand N., Bertrand B., Guyot B., Guiraud J.P., Fontana-Tachon A.** 2009. Study on the *Coffea arabica* / *Colletotrichum kahawae* pathosystem: Impact of a biological plant protection product = Untersuchungen am Wirt-Pathogen-System *Coffea arabica*/*Colletotrichum kahawae*: Wirkungseffizienz eines biologischen Pflanzenschutzprodukts. *Journal of plant diseases and protection*, 116 (2) : 78-85.
- Joët T., Laffargue A., Salmona J., Doulebeu S., Descroix F., Bertrand B., De Kochko A., Dussert S.** 2009. Metabolic pathways in tropical dicotyledonous albuminous seeds : *Coffea arabica* as a case study. *New phytologist*, 182 : 146-162.[20090402]. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02742.x>
- Posada H., Ferrand M., Davrieux F., Lashermes P., Bertrand B.** 2009. Stability across environments of the coffee variety near infrared spectral signature. *Heredity*, 102 (2): 113-119.[20090323]. <http://www.nature.com/hdy/journal/v102/n2/pdf/hdy200888a.pdf>
- Villarreal D., Laffargue A., Posada H., Bertrand B., Lashermes P., Dussert S.** 2009. Genotypic and environmental effects on coffee (*Coffea arabica* L.) bean fatty acid profile: Impact on variety and origin chemometric determination. *Journal of agricultural and food chemistry*, 57 (23): 11321-11327.[20091204]. <http://dx.doi.org/10.1021/jf902441n>
- Alpizar E., Dechamp E., Lapeyre-Montes F., Guilhaumon C., Bertrand B., Jourdan C., Lashermes P., Etienne H.** 2008. *Agrobacterium rhizogenes*-transformed roots of Coffee (*Coffea arabica*): Conditions for long-term proliferation, and morphological and molecular characterization. *Annals of botany*, 101 (7): 929-940. <http://dx.doi.org/10.1093/aob/mcn027>
- Bertrand B., Villarreal D., Laffargue A., Posada H., Lashermes P., Dussert S.** 2008. Comparison of the effectiveness of fatty acids, chlorogenic acids, and elements for the chemometric discrimination of coffee (*Coffea arabica* L.) varieties and growing origins. *Journal of agricultural and food chemistry*, 56 (6): 2273-2280.
- Gichuru E.K., Agwanda C.O., Combes M.C., Mutitu E.W., Ngugi E.C.K., Bertrand B., Lashermes P.** 2008. Identification of molecular markers linked to a gene conferring resistance to coffee berry disease (*Colletotrichum kahawae*) in *Coffea arabica*. *Plant pathology*, 57 (6): 1117-1124.[20081202]. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-3059.2008.01846.x>
- Labouisse J.P., Bellachew B., Kotecha S., Bertrand B.** 2008. Current status of coffee (*Coffea arabica* L.) genetic resources in Ethiopia : Implications for conservation. *Genetic resources and crop evolution*, 55 (7): 1079-1093.[20081020]. <http://dx.doi.org/10.1007/s10722-008-9361-7>
- Salmona J., Dussert S., Descroix F., De Kochko A., Bertrand B., Joët T.** 2008. Deciphering transcriptional networks that govern *Coffea arabica* seed development using combined cDNA array and real-time RT-PCR approaches . *Plant molecular biology*, 66 (1-2): 105-124. <http://dx.doi.org/10.1007/s11103-007-9256-6>
- Alpizar E., Etienne H., Bertrand B.** 2007. Intermediate resistance to *Meloidogyne exigua* root-knot nematode in *Coffea arabica*. *Crop Protection*, 26 (7) : 903-910. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cropro.2006.08.018>
- Alpizar E., Dechamp E., Espeout S., Royer M., Lecouls A.C., Nicole M., Bertrand B., Lashermes P., Etienne H.** 2006. Efficient production of *Agrobacterium rhizogenes*-transformed roots and composite plants for studying gene expression in coffee roots. *Plant cell reports*, 25 : 959-967. <http://dx.doi.org/10.1007/s00299-006-0159-9>
- Bertrand B., Vaast P., Alpizar E., Etienne H., Davrieux F., Charmetant P.** 2006. Comparison of bean biochemical composition and beverage quality of arabica hybrids involving Sudanese-Ethiopian origins with traditional varieties at various elevations in Central America. *Tree physiology*, 26 (9) : 1239-1248.
- Cilas C., Godin C., Bertrand B., Baillères H.** 2006. Genetic study on the physical properties of *Coffea arabica* L. wood. *Trees - Structure and function*, 20 (5) : 587-592. <http://dx.doi.org/10.1007/s00468-006-0073-3>

- Vaast P., Bertrand B., Perriot J.J., Guyot B., Génard M.** 2006. Fruit thinning and shade improve bean characteristics and beverage quality of coffee (*Coffea arabica* L.) under optimal conditions. *Journal of the science of food and agriculture*, 86 (2): 197-204. <http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.2338>
- Albarran J., Bertrand B., Lartaud M., Etienne H.** 2005. Cycle characteristics in a temporary immersion bioreactor affect regeneration, morphology, water and mineral status of coffee (*Coffea arabica*) somatic embryos. *Plant cell, tissue and organ culture*, 81: 27-36. <http://dx.doi.org/10.1007/s11240-004-2618-8>
- Bertrand B., Etienne H., Cilas C., Charrier A., Baradat P.** 2005. *Coffea arabica* hybrid performance for yield, fertility and bean weight. *Euphytica*, 141 (3) : 255-262. <http://dx.doi.org/10.1007/s10681-005-7681-7>
- Bertrand B., Etienne H., Lashermes P., Guyot B., Davrieux F.** 2005. Can near-infrared reflectance of green coffee be used to detect introgression in *Coffea arabica* cultivars?. *Journal of the science of food and agriculture*, 85 (6) : 955-962. <http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.2049>
- Hervé G., Bertrand B., Villain L., Licardié D., Cilas C.** 2005. Distribution analyses of *Meloidogyne* spp. and *Pratylenchus coffeae sensu lato* in coffee plots in Costa Rica and Guatemala. *Plant pathology*, 54 (4) : 471-475. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-3059.2005.01206.x>
- Bertrand B., Guyot B., Anthony F., Lashermes P.** 2003. Impact of the *Coffea canephora* gene introgression on beverage quality of *C. arabica*. *Theoretical and applied genetics*, 107 : 387-394. <http://dx.doi.org/10.1007/s00122-003-1203-6>
- Etienne H., Bertrand B.** 2003. Somaclonal variation in *Coffea arabica*: effects of genotype and embryogenic cell suspension age on frequency and phenotype of variants. *Tree physiology*, 23 (6) : 419-426.
- Noir S., Anthony F., Bertrand B., Combes M.C., Lashermes P.** 2003. Identification of a major gene (*Mex-1*) from *Coffea canephora* conferring resistance to *Meloidogyne exigua* in *Coffea arabica*. *Plant pathology*, 52 : 97-10. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-3059.2003.00795.x>
- Bertrand B., Anzueto F., Moran M.X., Eskes A., Etienne H.** 2002. Création et diffusion par embryogenèse somatique d'une variété porte-greffe (*Coffea canephora*) = Creation and distribution of a rootstock variety (*Coffea canephora*) by somatic embryogenesis. In : *Recherche et caféiculture*. Montpellier : CIRAD-CP, p. 95-107. (Plantations, recherche, développement, Mai).
- Anthony F., Combes M.C., Astorga C., Bertrand B., Graziosi G., Lashermes P.** 2002. The origin of cultivated *Coffea arabica* L. varieties revealed by AFLP and SSR markers. *Theoretical and Applied Genetics*, 104 (5) : 894-900. <http://dx.doi.org/10.1007/s00122-001-0798-8>
- Anthony F., Quiros O., Topart P., Bertrand B., Lashermes P.** 2002. Detection by simple sequence repeat markers of introgression from *Coffea canephora* in *Coffea arabica* cultivars. *Plant breeding*, 121 (6) : 542-544. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1439-0523.2002.00748.x>
- Barry-Etienne D., Bertrand B., Schlönvoigt A., Etienne H.** 2002. The morphological variability within a population of coffee somatic embryos produced in a bioreactor affects the regeneration and the development of plants in the nursery. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 68: 153-162. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1013874221569>
- Barry-Etienne D., Bertrand B., Vasquez N., Etienne H.** 2002. Comparison of somatic embryogenesis-derived coffee (*Coffea arabica* L.) plantlets regenerated *in vitro* or *ex vitro*: morphological, mineral and water characteristics. *Annals of botany*, 90 (1) : 77-85. <http://dx.doi.org/10.1093/aob/mcf149>

**Bertrand B., Ramirez G., Topart P., Anthony F.** 2002. Resistance of cultivated coffee (*Coffea arabica* and *C. canephora*) trees to corky-root caused by *Meloidogyne arabicida* and *Fusarium oxysporum*, under controlled and field conditions. *Crop Protection*, 21 (1) : 713-719. [http://dx.doi.org/10.1016/S0261-2194\(02\)00028-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0261-2194(02)00028-5)

**Etienne H., Anthony F., Dussert S., Fernandez D., Lashermes P., Bertrand B.** 2002. Biotechnological applications for the improvement of coffee (*Coffea arabica* L.). *In Vitro cellular and Developmental Biology. Plant*, 38 (2) : 129-138. <http://dx.doi.org/10.1079/IVP2001273>

**Anthony F., Bertrand B., Quiros O., Wilches A., Lashermes P., Berthaud J., Charrier A.** 2001. Genetic diversity of wild coffee (*Coffea arabica* L.) using molecular markers. *Euphytica*, 118 (1) : 53-65. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1004013815166>

**Anzueto F., Bertrand B., Sarah J.L., Eskes A., Decazy B.** 2001. Resistance to *Meloidogyne incognita* in Ethiopian *Coffea arabica* accessions. *Euphytica*, 118 (1) : 1-8. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1003712232325>

**Bertrand B., Anthony F., Lashermes P.** 2001. Breeding for resistance to *Meloidogyne exigua* in *Coffea arabica* by introgression of resistance genes of *Coffea canephora*. *Plant pathology*, 50 (5) : 637-643. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-3059.2001.00597.x>

**Bertrand B., Etienne H., Eskes A.** 2001. Growth, production, and bean quality of *Coffea arabica* as affected by interspecific grafting : Consequences for rootstock breeding. *HortScience*, 36 (2) : 269-273.

**Etienne H., Bertrand B.** 2001. Trueness-to-type and agronomic characteristics of *Coffea arabica* trees micropropagated by the embryogenic cell suspension technique. *Tree Physiology*, 21 (14) : 1031-1038.

**Bertrand B., Nunez C., Sarah J.L.** 2000. Disease complex in coffee involving *Meloidogyne arabicida* and *Fusarium oxysporum*. *Plant Pathology*, 49 (4) : 383-388. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-3059.2000.00456.x>

**Bertrand B., Pena Duran M.X., Anzueto F., Cilas C., Etienne H., Anthony F., Eskes A.** 2000. Genetic study of *Coffea canephora* coffee tree resistance to *Meloidogyne incognita* nematodes in Guatemala and *Meloidogyne* sp. nematodes in El Salvador for selection of rootstock varieties in Central America. *Euphytica*, 113 (2) : 79-86. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1003931918187>

**Cilas C., Montagnon C., Bertrand B., Godin C.** 2000. Wood elasticity of several *Coffea canephora* Pierre clones. A new trait to be included in selection schemes. *Agronomie*, 20 (4) : 439-444. <http://dx.doi.org/10.1051/agro:2000140>

**Combes M.C., Andrzejewski S., Anthony F., Bertrand B., Rovelli P., Graziosi G., Lashermes P.** 2000. Characterization of microsatellite loci in *Coffea arabica* and related coffee species. *Molecular ecology*, 9 (8) : 1178-1180. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-294x.2000.00954-5.x>

**Lashermes P., Andrzejewski S., Bertrand B., Combes M.C., Dussert S., Graziosi G., Trouslot P., Anthony F.** 2000. Molecular analysis of introgressive breeding in coffee (*Coffea arabica* L.). *Theoretical and Applied Genetics*, 100 (1) : 139-146. <http://dx.doi.org/10.1007/s001220050019>

**Etienne Barry D., Bertrand B., Vasquez N., Etienne H.** 1999. Direct sowing of *Coffea arabica* somatic embryos mass-produced in a bioreactor and regeneration of plants. *Plant Cell Reports*, 19 (2) : 111-117. <http://dx.doi.org/10.1007/s002990050720>

**Dossa E.L., Bertrand B., Aidam A.** 1994. In vitro micropropagation by cuttings of *Cola nitida* (Schott and Endl.). *Café Cacao Thé*, 38 (1) : 57-60.

**Bertrand B., Dupois V.** 1992. Contribution to the development of cloning in *Theobroma cacao* utilizing orthotropic axes. Constraints and prospects. *Café Cacao Thé*, 36 (1) : 9-26.



**Bertrand B., Jadin P.** 1992. Pursuit of suitable techniques for cacao replanting in Togo. I. Comparative study of various cacao-planting methods. *Café Cacao Thé*, 36 (2) : 115-120.

**Jagoret P., Bertrand B., Jadin P.** 1992 Pursuit of suitable techniques for cacao replanting in Togo. II. Comparative study of different husbandry techniques under research station conditions. *Café Cacao Thé*, 36 (3) : 207-212.

**Bertrand B., Cilas C.** L'utilisation de vrais jumeaux dans l'expérimentation cacaoyère. 1990. *Café Cacao Thé*, 34 (4) : 295-298.

**Bertrand B., Agbodjan A.K.** 1989. Le bouturage orthotrope : premiers résultats et perspectives. *Café Cacao Thé*, 33 (3) : 147-156.

**Cilas C., Amefia Y.K., Bertrand B.** Etude de l'accroissement du diamètre au collet dans un dispositif diallèle quasi-complet 8x8 chez le cacaoyer. 1988. *Café Cacao Thé*, 32 (1) : 17-22.

**Adibolo Y., Bertrand B.** 1988. Etude de l'origine de la variété Niaouli au Togo à l'aide de marqueurs isozymes *Café Cacao Thé*, 32 (4) : 293-298.

**Bertrand B.** 1987. Quelques aspects du microbouturage du cacaoyer ; *Café Cacao Thé*, 31 (3) : 175-182.

## OUVRAGES ET CHAPITRES D'OUVRAGES

---

**Montagnon M. Marraccini P., Bertrand B.** 2011. Breeding for coffee quality *In* Specialty Coffee, Managing quality, Edited by T Obertür, P Laderäch, H.A. Pohlen and J Cook. Springer [Etats-Unis] En cours d'édition.

**Lashermes P., Bertrand B., Etienne H.** 2009. Breeding coffee (*Coffea arabica*) for sustainable production. In : Jain Shri Mohan (ed.), Priyadarshan P.M. (ed.). *Breeding plantation tree crops : tropical species*. New York : Springer [Etats-Unis], p. 525-543.[20090204]. [http://dx.doi.org/10.1007/978-0-387-71201-7\\_14](http://dx.doi.org/10.1007/978-0-387-71201-7_14)

**Bertrand B., Anthony F.** 2008. Genetics of resistance to root-knot nematodes (*Meloidogyne* spp.) and breeding. In : Souza Ricardo M. (ed.). *Plant-parasitic nematodes of coffee*. Berlin : Springer [Allemagne], p. 165-190.[http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-8720-2\\_9](http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-8720-2_9)

**Anthony F., Bertrand B., Astorga C., Lashermes P.** 2007. Characterization and assessment of *Coffea arabica* L. genetic resources conserved in the CATIE field genebank. In : Engelmann Florent (ed.), Dullo Mohammad Ehsan (ed.), Astorga Carlos (ed.), Dussert Stéphane (ed.), Anthony François (ed.). *Conserving coffee genetic resources : Complementary strategies for ex situ conservation of coffee (Coffea arabica L.) genetic resources. A case study in CATIE, Costa Rica*. Rome : Bioversity International, p. 35-44.

**Bertrand B., Etienne H., Davrieux F., Guyot B.** 2006. Central America and the Caribbean, breeding for quality. In : Montagnon Christophe (ed.). *Coffee: terroirs and qualities*. Versailles : Ed. Quae, p. 147-161.

**Bertrand B., Etienne H., Davrieux F., Guyot B.** 2003. Amérique centrale et Caraïbe, amélioration variétale et qualité. In : Montagnon Christophe (ed.). *Cafés : terroirs et qualités*. Montpellier : CIRAD, p. 129-143.

**Bertrand B., Anzueto F., Moran M.X., Eskes A., Etienne H.** 2002. Création et diffusion par embryogenèse somatique d'une variété porte-greffe (*Coffea canephora*) = Creation and distribution of a rootstock variety (*Coffea canephora*) by somatic embryogenesis. In : *Recherche et caféiculture*. Montpellier : CIRAD-CP, p. 95-107. (Plantations, recherche, développement, Mai).

**Montagnon C., Leroy T., Bertrand B., Charmetant P., Dufour M.** 2002. Recent coffee genetic improvement results. In : *Recherche et caféiculture*. Montpellier : CIRAD-CP, p. 84-94. (Plantations, recherche, développement, Mai).

**Bertrand B., Aguilar G., Santacreo R., Anzueto F.** 1999. El mejoramiento genético en América Central. In : Bertrand Benoit (ed.), Rapidel Bruno (ed.). *Desafíos de la caficultura en Centroamérica*. San Jose : IICA, p.407-456.

**Bertrand B. (ed.), Rapidel B. (ed.)**. 1999. Desafíos de la caficultura en Centroamérica. San Jose : IICA, 496 p.

## ACTES ET COMMUNICATIONS A CONGRES

---

Plus de 70 communications et actes à congrès.

**Bardil, Combes M.C., Lashermes P., Bertrand B.** 2010. Gene expression divergences between the allopolyploid *coffea arabica* and its diploids relatives appear environment-dependant : [Abstract]. In : *Abstracts of Plant and Animal Genomes XVIIIth Conference, San Diego, CA (USA), January 09-13, 2010*. [Online]. [S.I.] : s.n.. Plant and Animal Genomes Conference. 18, 2010-01-09/2010-01-13, San Diego, Etats-Unis. [20100720]. [http://www.intl-pag.org/18/abstracts/W20\\_PAGXVIII\\_157.html](http://www.intl-pag.org/18/abstracts/W20_PAGXVIII_157.html)

**Etienne H., Bertrand B., Ribas A., Lashermes P., Malo E., Montagnon C., Alpizar E., Bobadilla R., Simpson J., Dechamp E., Jourdan I., Georget F.** 2010. Current application of coffe (*Coffea arabica*) somatic embryogenesis for industrial propagation of elite heterozygous materials in Central America and Mexico and for routine functional genomics : [Abstract]. In : IUFRO Working Party 2.09.02 : Somatic Embryogenesis of Forest Trees Conferences, August 19-21, 2010, Suwon, Korea. *Advances in somatic embryogenesis of trees and its application for the future forests and plantations* . s.l. : s.n., p. 54-55. IUFRO Working Party 2.09.02 : Somatic Embryogenesis of Forest Tree Conference, 2010-08-19/2010-08-21, Suwon, Corée.

**Menendez-Yuffa A., Bertrand B., Georget F., Jourdan I., Lashermes P., Malo E., Montagnon C., Santoni S., Tollon C., Etienne H.** 2010. Microsatellite polymorphism in hybrids of *Coffea arabia* (L.) produced industrially by somatic embryogenesis : [Abstract]. In : IAPB. *12th IAPB Congress. Sustainability through agricultural biotechnology : food, biomaterials, energy and environment, June 6-11, 2010, Saint Louis, Missouri, USA* . s.l. : s.n., 1 p. IAPB Congress. 12, 2010-06-06/2010-06-11, Saint Louis, Etats-Unis.

**Villain L., Bertrand B., Lashermes P., Etienne H., Anthony F.** 2009. Sources of resistance to root-knot nematodes in coffee : characterisation, genetic bases and perspectives : [Abstract] = Fontes de resistência a nematoides das galhas em café : caracterização, bases genéticas e perspectivas. In : *Second International Congress of Tropical Nematology, Maceio Alagoas, Brazil, October 4-9, 2009*. s.l. : s.n., p. 258. International Congress of Tropical Nematology. 2, 2009-10-04/2009-10-09, Maceio Alagoas, Brésil.

**Durand N., Bertrand B., Guyot B., Guiraud J.P., Fontana-Tachon A.** 2008. Study on the *Coffea arabica/Colletotrichum kahawae* pathosystem. Impact of a Natural Elicitor (FEN 560) on this pathosystem : [PA597]. In : *22nd International Conference on Coffee Science*. [Cd-Rom]. Montpellier : ASIC, p. 1563-1567. International Conference on Coffee Science. 22, 2008-09-14/2008-09-19, Campinas, Brésil.

**Getu B., Bayetta B., Habtamu Z., Labouisse J.P., Davrieux F., Bertrand B.** 2008. Stability of sensorial and biochemical traits of different geographical origin ethiopian arabica coffee (*Coffea arabica* L.) accessions under three contrasting environmental conditions : [PC789]. In : *22nd International Conference on Coffee Science*. [Cd-Rom]. Montpellier : ASIC, p. 604-607. International Conference on Coffee Science. 22, 2008-09-14/2008-09-19, Campinas, Brésil.

**Gichuru E.K., Combes M.C., Mutitu E.W., Ngugi E.C.K., Omondi C.O., Bertrand B., Lashermes P.** 2008. Towards the development of sequence based markers for resistance to Coffee Berry Disease (*Colletotrichum kahawae*) : [B202]. In : *22nd International Conference on Coffee Science*. [Cd-Rom]. Montpellier : ASIC, p. 837-842. International Conference on Coffee Science. 22, 2008-09-14/2008-09-19, Campinas, Brésil.

**Loureiro A.A., Silva M.D.C., Varzea V., Moncada P., Bertrand B., Nicole M.** 2008. Histological and ultrastructural characterization of coffee resistance to *Colletotrichum kahawae* : [PB659]. In : *22nd International Conference on Coffee Science*. [Cd-Rom]. Montpellier : ASIC, p. 1040-1044. International Conference on Coffee Science. 22, 2008-09-14/2008-09-19, Campinas, Brésil.

**Posada H., Ferrand M., Davrieux F., Lashermes P., Bertrand B.** 2008. Near infrared spectral signature and their stability across environments : [C312]. In : *22nd International Conference on Coffee Science*. [Cd-Rom]. Montpellier : ASIC, p. 438-447. International Conference on Coffee Science. 22, 2008-09-14/2008-09-19, Campinas, Brésil.

**Privat I., Bertrand B., Lashermes P.** 2008. The Coffee Microarray Project: a new tool to discover candidate genes correlated to quality traits : [Abstract]. In : *Abstracts of Plant and Animal Genomes XVIth Conference, San Diego, CA (USA), January 12-16, 2008*. [Online]. [S.I.] : s.n..

Plant and Animal Genomes Conference. 16, 2008-01-12/2008-01-16, San Diego, Etats Unis. [20080820]. [http://www.intl-pag.org/16/abstracts/PAG16\\_W14\\_114.html](http://www.intl-pag.org/16/abstracts/PAG16_W14_114.html)

**Villarreal D., Bertrand B., Laffargue A., Posada H., Lashermes P., Dussert S.** 2008. Chemometric discrimination of coffee (*Coffea arabica* L.) genotypes and growig origins : [A124]. In : *22nd International Conference on Coffee Science*. [Cd-Rom]. Montpellier : ASIC, p. 1497-1506. International Conference on Coffee Science. 22, 2008-09-14/2008-09-19, Campinas, Brésil.

**Alpizar E., Dechamp E., Bertrand B., Lashermes P., Etienne H.** 2007. Transgenic roots for functional genomics of coffee resistance genes to root-knot nematodes. In : *21st International Conference on Coffee Science, Montpellier (France), 11th - 15th September 2006*. [Cd-Rom]. Montpellier : ASIC, p. 653-659. Colloque Scientifique International sur le Café. 21, 2006-09-11/2006-09-15, Montpellier, France.

**Charmetant P., Etienne H., Santacreo R., Cisneros B., Anzueto F., Gil S., Alpizar E., Bertrand B.** 2007. *Coffea arabica* clones from F1 hybrids in Central America. In : *21st International Conference on Coffee Science, Montpellier (France), 11th - 15th September 2006*. [Cd-Rom]. Montpellier : ASIC, p. 1140-1146. Colloque Scientifique International sur le Café. 21, 2006-09-11/2006-09-15, Montpellier, France.

**Gichuru E.K., Agwanda C.O., Combes M.C., Mutitu E.W., Ngugi E.C.K., Bertrand B., Lashermes P.** 2007. Characterisation and genetic mapping of a gene conferring resistance to coffee berry disease (*Colletotrichum kahawae*) in Arabica coffee (*Coffea arabica* L.). In : *21st International Conference on Coffee Science, Montpellier (France), 11th - 15th September 2006*. [Cd-Rom]. Montpellier : ASIC, p. 786-793. Colloque Scientifique International sur le Café. 21, 2006-09-11/2006-09-15, Montpellier, France.

**Guerra-Guimarães L., Azinheira H.G., Martins A.C., Silva M.C., Gichuru E.K., Varzea V., Bertrand B.** 2007. Antagonistic interaction between *Epicoccum nigrum* and *Colletotrichum kahawae*, the causal agent of coffee berry disease. In : *21st International Conference on Coffee Science, Montpellier (France), 11th - 15th September 2006*. [Cd-Rom]. Montpellier : ASIC, p. 1284-1290. Colloque Scientifique International sur le Café. 21, 2006-09-11/2006-09-15, Montpellier, France.

**Joët T., Salmona J., Descroix F., Dussert S., Bertrand B., Noirot M.** 2007. Targeted transcriptome profiling during seed development in *Coffea arabica* cv. Laurina. In : *21st International Conference on Coffee Science, Montpellier (France), 11th - 15th September 2006*. [Cd-Rom]. Montpellier : ASIC, p. 687-694. Colloque Scientifique International sur le Café. 21, 2006-09-11/2006-09-15, Montpellier, France.

**Labouisse J.P., Bellachew B., Hamelin C., Kotecha S., Bertrand B.** 2007. Collection and *ex situ* conservation of coffee landraces in Ethiopia. The example of Harerge. In : *21st International Conference on Coffee Science, Montpellier (France), 11th - 15th September 2006*. [Cd-Rom]. Montpellier : ASIC, p. 926-930. Colloque Scientifique International sur le Café. 21, 2006-09-11/2006-09-15, Montpellier, France.

**Loureiro A.A., Varzea V., Guerra-Guimarães L., Ribeiro Almeida F., Silva M.C., Bertrand B.** 2007. Characterization of *Colletotrichum kahawae* diversity. In : *21st International Conference on Coffee Science, Montpellier (France), 11th - 15th September 2006*. [Cd-Rom]. Montpellier : ASIC, p. 1277-1283. Colloque Scientifique International sur le Café. 21, 2006-09-11/2006-09-15, Montpellier, France.

**Villain L., Sarah J.L., Hernandez A., Charmetant P., Bertrand B., Anthony F., Topart P., Lashermes P., Anzueto F., Carneiro R.M.D.G.** 2007. Biodiversity of root knot nematodes, *Meloidogyne* spp., on coffee in Central America. In : *21st International Conference on Coffee Science, Montpellier (France), 11th - 15th September 2006*. [Cd-Rom]. Montpellier : ASIC, p. 1321-1324. Colloque Scientifique International sur le Café. 21, 2006-09-11/2006-09-15, Montpellier, France.

**Lançon J., Bertrand B., Clément-Demange A., Hocdé H., Nouy B., Trouche G.** 2006. What determines the stakeholders' participation in plant breeding programs? Case studies in the South = Qu'est-ce qui détermine l'implication des acteurs dans les programmes de sélection ? Etudes de cas au Sud. In : Lançon Jacques (ed.), Floquet Anne (ed.), Weltzien Eva (ed.). *Partenaires pour construire des projets de sélection participative : Actes de l'atelier-recherche, 14-18 mars 2005, Cotonou, Bénin*. Montpellier : CIRAD, p. 179-193. Atelier - Recherche sur la Gestion du Partenariat dans les Projets de Sélection Participative, 2005-03-14/2005-03-18, Cotonou, Bénin.

**Mouen Bedimo J.A., Bieysse D., Bertrand B., Nottéghem J.L., Cilas C.** 2006. Répartition spatiale de l'anthracnose des baies du caféier arabica (*Colletotrichum kahawae*) à l'échelle d'une parcelle au Cameroun : [Résumé]. In : Fernandez Diana (ed.), Carlier Jean (ed.), Tharreau Didier (ed.). *Journées Jean Chevaugéon : Vle rencontres de phytopathologie - mycologie de la Société française de phytopathologie du 15 au 19 janvier 2006 [Résumés]*. Montpellier : CIRAD, p. 36. Journées Jean Chevaugéon, Rencontres de phytopathologie-mycologie. 6, 2006-01-15/2006-01-19, Aussois, France.

**Alpizar E., Bertrand B.** 2005. Incidence of elevation on chemical composition and beverage quality of coffee in Central America. In : *20th International Conference on Coffee Science, 11-15 October 2004, Bangalore, India*. [Cd-Rom]. Paris : ASIC, p. 322-327. Colloque Scientifique International sur le Café. 20, 2004-10-11/2004-10-15, Bangalore, Inde.

**Alpizar E., Etienne H., Lashermes P., Bertrand B.** 2005. Complete and partial resistance to *Meloidogyne exigua* in *Coffea arabica* modified pre-existing field nematode populations. In : *20th International Conference on Coffee Science, 11-15 October 2004, Bangalore, India*. [Cd-Rom]. Paris : ASIC, p. 1260-1262. Colloque Scientifique International sur le Café. 20, 2004-10-11/2004-10-15, Bangalore, Inde.

**Alpizar E., Vaast P., Bertrand B.** 2005. Fat content: A quality indicator for Central America coffees?. In : *20th International Conference on Coffee Science, 11-15 October 2004, Bangalore, India*. [Cd-Rom]. Paris : ASIC, p. 1074-1076. Colloque Scientifique International sur le Café. 20, 2004-10-11/2004-10-15, Bangalore, Inde.

**Bertrand B., Etienne H., Guyot B., Vaast P.** 2005. Year of production and canopy region influence bean characteristics and beverage quality of Arabica coffee. In : *20th International Conference on Coffee Science, 11-15 October 2004, Bangalore, India*. [Cd-Rom]. Paris : ASIC, p. 878-885. Colloque Scientifique International sur le Café. 20, 2004-10-11/2004-10-15, Bangalore, Inde.

**Bertrand B., Guyot B., Anthony F., Selva J.C., Alpizar S.J.M., Etienne H., Lashermes P.** 2005. The drop of beverage quality caused by *Coffea canephora* gene introgression can be avoided by selection. In : *20th International Conference on Coffee Science, 11-15 October 2004, Bangalore, India*. [Cd-Rom]. Paris : ASIC, p. 606-618. Colloque Scientifique International sur le Café. 20, 2004-10-11/2004-10-15, Bangalore, Inde.

**Etienne H., Alpizar E., Dechamp E., Bertrand B.** 2005. Agronomic performance and trueness-to-type of *Coffea arabica* hybrids mass-propagated by somatic embryogenesis. In : *20th International Conference on Coffee Science, 11-15 October 2004, Bangalore, India*. [Cd-Rom]. Paris : ASIC, p. 897-907. Colloque Scientifique International sur le Café. 20, 2004-10-11/2004-10-15, Bangalore, Inde.

**Lashermes P., Noir S., Combes M.C., Ansaldi C., Bertrand B., Anthony F.** 2005. Toward an integrated physical map of the coffee genome. In : *20th International Conference on Coffee Science, 11-15 October 2004, Bangalore, India*. [Cd-Rom]. Paris : ASIC, p. 554-559. Colloque Scientifique International sur le Café. 20, 2004-10-11/2004-10-15, Bangalore, Inde.

**Santacreo R., Pineda A., Bertrand B., Charmetant P.** 2005. Estabilidad de familias híbridas F1 entre variedades comerciales, y algunas selecciones catimor y sarchimor con árboles silvestres de origen Etíope en Honduras. In : *La caficultura sostenible, un desafío impostergable. XXI Simposio Latinoamericano de caficultura, 14 y 15 de julio de 2005, San Salvador, El Salvador*. [Cd-Rom]. Tegucigalpa : IICA-PROMECAFE, p. 66-77. Simposio Latinoamericano de Caficultura. 21, 2005-07-14/2005-07-15, San Salvador, Salvador.

**Davrieux F., Bertrand B., Bastianelli D., Guyot B.** 2003. Authentication of three green coffee cultivars from Costa Rica by near infrared spectroscopy : Preliminary study. In : *11th International Conference on Near Infrared Spectroscopy, Cordoba, Spain, April 06-11, 2003*. s.l. : s.n., 1 p. International Conference on Near Infrared Spectroscopy. 11, 2003-04-06/2003-04-11, Cordoue, Espagne.

**Anthony F., Combes M.C., Herrera J.C., Prakash N.S., Bertrand B., Lashermes P.** 2001. Genetic diversity and introgression analyses in coffee (*Coffea arabica* L.) using molecular markers. In : *Dix-neuvième colloque scientifique international sur le café. Actes*. [Cd-Rom]. Paris : ASIC, 1 disque optique numérique (CD-ROM). Colloque scientifique international sur le café. 19, 2001-05-14/2001-05-18, Trieste, Italie.

**Berthouly M., Charmetant P., Bertrand B., Barry-Etienne D., Vasquez N., Lartaud M., Nyange N.E., Etienne H.** 2001. Temporary immersion : a technique for mass propagation of heterozygous *Coffea spp.* genotypes through somatic embryogenesis. In : *Dix-neuvième colloque scientifique international sur le café. Actes*. [Cd-Rom]. Paris : ASIC, 1 disque optique numérique (CD-ROM). Colloque scientifique international sur le café. 19, 2001-05-14/2001-05-18, Trieste, Italie.

**Bertrand B., Vaast P., Avelino J., Perriot J.J., Guyot B.** 2001. Estudio de los componentes de la calidad del café [Poster]. In : *Exposition itinérante, Guatemala (Guatemala), 17-18/09/2001, San Salvador (Salvador), 6-7/11/2001, Managua (Nicaragua), 7-9/06/2002, San Pedro Sula (Honduras), 8-9/08/2002. "Veinte años de investigación y cooperación franco-centroamericana en caficultura"*. s.l. : s.n., 1 p. Veinte Años de Investigación y Cooperación Franco-Centroamericana en Caficultura [Exposition itinérante], 2001-09-17/2002-11-14, Guatemala, Guatemala / San Salvador, Salvador / Managua, Nicaragua / San Pedro Sula, Honduras / Zamorano, Honduras / San José, Costa Rica.

**Fernandez D., Noir S., Agostini C., Bon M.C., Combes M.C., Silva M.C., Guerra-Guimarães L., Anthony F., Bertrand B., Lashermes P.** 2001. Molecular physiology and genetics of coffee resistance to parasites. In : *Dix-neuvième colloque scientifique international sur le café. Actes*. [Cd-Rom]. Paris : ASIC, 1 disque optique numérique (CD-ROM). Colloque scientifique international sur le café. 19, 2001-05-14/2001-05-18, Trieste, Italie.

**Anthony F., Astorga C., Bertrand B., Dussert S., Lashermes P.** 2000. Diversidad de los recursos genéticos del café (*Coffea arabica*), disponible para el mejoramiento genético. In : Anthony François (ed.), Rodríguez Ely (ed.). *Mejoramiento sostenible del café Arabica por los recursos genéticos, asistido por los marcadores moleculares, con énfasis en la resistencia a los nematodos : Memorias del Taller, del 29 al 30 de agosto de 2000*. Turrialba : CATIE, p. 11-15. Taller de Mejoramiento Sostenible del Café Arabica por los Recursos Genéticos, Asistido por los Marcadores Moleculares, con Énfasis en la Resistencia a los Nematodos, 2000-08-29/2000-08-30, Turrialba, Costa Rica.

**Anthony F., Astorga C., Quiros O., Bertrand B., Etienne H., Topart P., Lashermes P.** 2000. Diversidad genética de los cafés (*Coffea arabica*) silvestres y cultivados, revelada por marcadores moleculares. In : *XIX Simposio Latinoamericano de caficultura del 2 al 6 de octubre, San José, Costa Rica. Memoria*. Tegucigalpa : IICA-PROMECAFE, p. 251-261. (Serie de ponencias, resultados y recomendaciones de eventos técnicos). Simposio Latinoamericano de Caficultura. 19, 2000-10-02/2000-10-06, San José, Costa Rica.

**Anthony F., Bertrand B., Quiros O., Etienne H., Lashermes P.** 2000. Diversidad genética de los cafés silvestres (*Coffea arabica* L.) detectada por marcadores moleculares [Resumen]. In : by Romero, R.M., Hernandez, A. and Solano, G. (eds.). *Congreso Perspectivas y Limitaciones de la Biotecnología en Países en Desarrollo, 24-28 de enero, 2000, San José, Costa Rica. Libro de resúmenes*. San José : Universidad de San José, p. 82. Congreso "Perspectivas y Limitaciones de la Biotecnología en Países en Desarrollo", 2000-01-24/2000-01-28, San José, Costa Rica.

**Anzueto F., Molina A., Figueroa P., Etienne H., Bertrand B.** 2000. Desarrollo de la variedad porta-injertos "Nemaya" (*C. canephora*) por medio de embriogenesis somática en Centroamérica. In : Riede Carlos Roberto (ed.), Sera Tumor (ed.), Soccol Carlos Ricardo (ed.), Roussos Sevastianos (ed.). *III Seminario internacional sobre biotecnología en agroindustria cafeeira : 24-28 de maio 1999, Londrina - PR - Brasil*. Londrina : IAPAR, p. 103-107. International Seminar on Biotechnology in the Coffee Agroindustry. 3, 1999-05-24/1999-05-28, Londrina, Brésil.

**Bertrand B., Araya A., Topart F., Anthony F.** 2000. The coffee 'Corky-root' disease, ethiology and genetic resistance [Abstract]. In : Anthony François (ed.), Rodriguez Ely (ed.). *Mejoramiento sostenible del café Arabica por los recursos genéticos, asistido por los marcadores moleculares, con énfasis en la resistencia a los nematodos : Memorias del Taller, del 29 al 30 de agosto de 2000*. Turrialba : CATIE, p. 67. Taller de Mejoramiento Sostenible del Café Arabica por los Recursos Genéticos, Asistido por los Marcadores Moleculares, con Énfasis en la Resistencia a los Nematodos, 2000-08-29/2000-08-30, Turrialba, Costa Rica.

**Bertrand B., Etienne H., Santacreo R., Anzueto F., Anthony F.** 2000. El mejoramiento genético en América Central. In : Riede Carlos Roberto (ed.), Sera Tumor (ed.), Soccol Carlos Ricardo (ed.), Roussos Sevastianos (ed.). *III Seminario internacional sobre biotecnología en agroindustria cafeeira : 24-28 de maio 1999, Londrina - PR - Brasil*. Londrina : IAPAR, p. 231-243. International Seminar on Biotechnology in the Coffee Agroindustry. 3, 1999-05-24/1999-05-28, Londrina, Brésil.

**Bertrand B., Nuñez, Araya A.** 2000. 'Corchosis' of coffee in Costa Rica : A complex disease caused by *Meloigogyne Arabicida* y *Fusarium Oxysporum*. In : XIX Simposio Latinoamericano de caficultura del 2 al 6 de octubre, San José, Costa Rica. *Memoria*. Tegucigalpa : IICA-PROMECAFE, p. 405-415. (Serie de ponencias, resultados y recomendaciones de eventos técnicos). Simposio Latinoamericano de Caficultura. 19, 2000-10-02/2000-10-06, San José, Costa Rica.

**Bertrand B., Santacreo R., Anzueto F., Peña de Moran X., Anthony F., Etienne H.** 2000. Utilización de los recursos genéticos para la creación varietal en América Central [Resumen]. In : Anthony François (ed.), Rodriguez Ely (ed.). *Mejoramiento sostenible del café Arabica por los recursos genéticos, asistido por los marcadores moleculares, con énfasis en la resistencia a los nematodos : Memorias del Taller, del 29 al 30 de agosto de 2000*. Turrialba : CATIE, p. 39. Taller de Mejoramiento Sostenible del Café Arabica por los Recursos Genéticos, Asistido por los Marcadores Moleculares, con Énfasis en la Resistencia a los Nematodos, 2000-08-29/2000-08-30, Turrialba, Costa Rica.

**Bertrand B., Topart P., Ayara A., Avendano J., Graziosi G., Lashermes P., Anthony F.** 2000. Estudio genético de la resistencia del café a *Meloidogyne exigua* de Costa Rica. In : Anthony François (ed.), Rodriguez Ely (ed.). *Mejoramiento sostenible del café Arabica por los recursos genéticos, asistido por los marcadores moleculares, con énfasis en la resistencia a los nematodos : Memorias del Taller, del 29 al 30 de agosto de 2000*. Turrialba : CATIE, p. 69-70. Taller de Mejoramiento Sostenible del Café Arabica por los Recursos Genéticos, Asistido por los Marcadores Moleculares, con Énfasis en la Resistencia a los Nematodos, 2000-08-29/2000-08-30, Turrialba, Costa Rica.

**Etienne H., Solano W., Pereira A., Bertrand B., Vasquez N., Barry-Etienne D.** 2000. A solution for the utilization of in vitro culture for mass-diffusion of *Coffea arabica* elite materials : The direct sowing of somatic embryos produced in a bioreactor. In : XIX Simposio Latinoamericano de caficultura del 2 al 6 de octubre, San José, Costa Rica. *Memoria*. Tegucigalpa : IICA-PROMECAFE, p. 273-283. (Serie de ponencias, resultados y recomendaciones de eventos técnicos). Simposio Latinoamericano de Caficultura. 19, 2000-10-02/2000-10-06, San José, Costa Rica.

**Etienne H., Vasquez N., Solano W., Pereira A., Anthony F., Barry-Etienne D., Salazar C., Bertrand B.** 2000. Uso de la embriogénesis somática en biorreactor para la propagación masal de materiales elites de café en América Central y Caribe [Resumen]. In : by Romero, R.M., Hernandez, A. and Solano, G. (eds.). *Congreso Perspectivas y Limitaciones de la Biotecnología en Países en Desarrollo, 24-28 de enero, 2000, San José, Costa Rica. Libro de resúmenes*. San José : Universidad de San José, p. 100. Congreso "Perspectivas y Limitaciones de la Biotecnología en Países en Desarrollo", 2000-01-24/2000-01-28, San José, Costa Rica.

**Lashermes P., Bertrand B., Anthony F.** 2000. Current status of molecular research on coffee with special reference to marker assisted breeding : Scope and limitations. In : CCRI. *Proceedings of the International Scientific Symposium on Coffee, December 4, 2000, Bangalore, India*. Chikmagalur : CCRI, p. 31-39. International Scientific Symposium on Coffee, 2000-12-04, Bangalore, Inde.

**Lashermes P., Combes M.C., Herrera J.C., Noir S., Prakash N.S., Bertrand B., Anthony F.** 2000. Molecular marker-assisted breeding: A coffee perspective. In : Anthony François (ed.), Rodriguez Ely (ed.). *Mejoramiento sostenible del café Arabica por los recursos genéticos, asistido por los marcadores moleculares, con énfasis en la resistencia a los nematodos : Memorias del Taller, del 29 al 30 de agosto de 2000*. Turrialba : CATIE, p. 85-90. Taller de Mejoramiento Sostenible del Café Arabica por los Recursos Genéticos, Asistido por los Marcadores Moleculares, con Énfasis en la Resistencia a los Nematodos, 2000-08-29/2000-08-30, Turrialba, Costa Rica.

**Lashermes P., Combes M.C., Topart P., Graziosi G., Bertrand B., Anthony F.** 2000. Molecular breeding in coffee (*Coffea arabica* L.). In : Sera T. (ed.), Soccol Carlos Ricardo (ed.), Pandey Ashok (ed.), Roussos S. (ed.). *Coffee biotechnology and quality : proceedings of the 3rd international seminar on biotechnology in the coffee agro-industry, Londrina, Brazil*. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, p. 101-112. International Seminar on Biotechnology in the Coffee Agroindustry. 3, 1999-05-24/1999-05-28, Londrina, Brésil.

**Barry-Etienne D., Teisson C., Berthouly M., Côte F., Bertrand B., Etienne H.** 1998. Direct transfert in greenhouse of coffee somatic embryos produced by temporary immersion. In : IAPTC. *Plant biotechnology and in vitro biology in the 21st century : abstracts = [Biotecnologie et biologie in vitro chez les plantes au 21ème siècle]*. Jérusalem : IAPTC, p.113. International Congress on Plant Tissue and Cell Culture. 9, 1998-06-14/1998-06-19, Jérusalem, Israël.

**Bertrand B., Aguilar G., Santacreo R., Anthony F., Etienne H., Eskes A., Charrier A.** 1998. Comportement d'hybrides F1 de *Coffea arabica* pour la vigueur, la production et la fertilité en Amérique Centrale. In : *Dix-septième colloque scientifique international sur le café, Nairobi (Kenya), 20-25 juillet 1997*. Paris : ASIC, p.415-423. Colloque Scientifique International sur le Café. 17, 1997-07-20/1997-07-25, Nairobi, Kenya.

**Bertrand B., Borbon O., Aguilar G.** 1998. Situacion nematologica en un cafetal de la meseta central de Costa Rica y posibilidades de control. In : *Memoria "III Seminario de resultados y avances de investigacion 1997"*. San José : ICAFE, p.15-28. Seminario de Resultados y Avances de Investigacion. 3, 1997, San José, Costa Rica.

**Etienne H., Bertrand B., Anthony F., Côte F., Berthouly M.** 1998. L'embryogenèse somatique : un outil pour l'amélioration génétique du caféier. In : *Dix-septième colloque scientifique international sur le café, Nairobi (Kenya), 20-25 juillet 1997*. Paris : ASIC, p.457-465. Colloque Scientifique International sur le Café. 17, 1997-07-20/1997-07-25, Nairobi, Kenya.

**Bertrand B., Aguilar G., Anthony F., Etienne H., Santacreo R.** 1997. Comparacion de hibridos F1 con variedades de *Coffea arabica*. In : Ibarra E.L.. *XVIII Simposio latinoamericano de caficultura. Memorias*. San José : IICA-PROMECAFE, p.245-251. (Ponencias, Resultados y Recomendaciones de Eventos Tecnicos, n. A1/SC-97-05). Simposio Latinoamericano de Caficultura. 18, 1997-09-16/1997-09-18, San José, Costa Rica.

**Etienne H., Solano W., Pereira A., Barry D., Bertrand B., Anthony F., Côte F., Berthouly M.** 1997. Utilizacion de la embriogenesis somatica en medio liquido para la propagacion masal de los hibridos F1 de *Coffea arabica*. In : Ibarra E.L.. *XVIII Simposio latinoamericano de caficultura. Memorias*. San José : IICA-PROMECAFE, p.253-261. (Ponencias, Resultados y Recomendaciones de Eventos Tecnicos, n. A1/SC-97-05). Simposio Latinoamericano de Caficultura. 18, 1997-09-16/1997-09-18, San José, Costa Rica.

**Aguilar G., Bertrand B., Anthony F.** 1996. Comportamiento agronomico y resistencia a las principales plagas de diferentes variedades, derivadas del hibrido de Timor. In : Ibarra E.L. (ed.). *XVII Simposio sobre caficultura latinoamericana. Vol 1 y 2*. Tegucigalpa : IICA-PROMECAFE, 13 p. (Ponencias, Resultados y Recomendaciones de Eventos Tecnicos, 2 vol.,n. A1/HN-96-001). Simposio sobre Caficultura Latinoamericana. 17, 1995-10-23/1995-10-27, (San Salvador, Salvador).

**Anzueto F., Bertrand B., Pena M., Marban Mendoza N., Villain L.** 1996. Desarrollo de una variedad porta-injerto resistente a los principales nematodos de America Central. In : Ibarra E.L. (ed.). *XVII Simposio sobre caficultura latinoamericana. Vol 1 y 2*. Tegucigalpa : IICA-PROMECAFE, 7 p. (Ponencias, Resultados y Recomendaciones de Eventos Tecnicos, 2 vol.,n. A1/HN-96-001). Simposio sobre Caficultura Latinoamericana. 17, 1995-10-23/1995-10-27, (San Salvador, Salvador).

**Anthony F., Bertrand B.** 1995. Estudio molecular de los recursos genéticos de café: resultados preliminares y trabajos en curso = Etude moléculaire des ressources génétiques du caféier : résultats préliminaires et travaux en cours. In : Vasquez Nelly, Escalant Jean-Vincent. *Symposium CIRAD/CATIE amélioration génétique et développement des cultures tropicales, 20 au 29 novembre 1995, Turrialba, Costa Rica*. Turrialba : CATIE, p.23. Simposio sobre Mejoramiento genético y desarrollo de los cultivos tropicales, 1995-11-20/1995-11-29, Turrialba, Costa Rica.

**Anthony F., Bertrand B., Dufour M., Escalant J.V.** 1995. Evaluacion y caracterizacion de los recursos genéticos de café conservados en el germoplasma del CATIE. In : *XVI Simposio sobre caficultura latinoamericana. Vol. 1 y 2*. Tegucigalpa : IICA-PROMECAFE, [7 p.] p. (Ponencias, Resultados y Recomendaciones de Eventos Tecnicos, 2 vol.). Simposio sobre Caficultura Latinoamericana. 16, 1993-10-25/1993-10-29, (Managua, Nicaragua).

**Bertrand B.** 1995. Incidencia de *Bixadus sierricola*, (White), sobre tres especies de coffea. Posibilidades de control genetico. In : IICA-PROMECAFE; INMECAFE. *XV Simposio sobre caficultura latinoamericana = [XVème symposium sur la caféiculture latino-américaine]*. Tegucigalpa : IICA-PROMECAFE. Simposio sobre Caficultura Latinoamericana. 15, 1992-07-21/1992-07-24, (Xalapa, Mexico).

**Bertrand B., Anthony F.** 1995. El mejoramiento genético de *Coffea arabica* en América Central = L'amélioration génétique de *Coffea arabica* en Amérique Centrale. In : Vasquez Nelly, Escalant Jean-Vincent. *Symposium CIRAD/CATIE amélioration génétique et développement des cultures tropicales, 20 au 29 novembre 1995, Turrialba, Costa Rica*. Turrialba : CATIE, p.32 (1 p.). Simposio sobre Mejoramiento genético y desarrollo de los cultivos tropicales, 1995-11-20/1995-11-29, Turrialba, Costa Rica.

**Bertrand B., Anzueto F., Pena M.X., Anthony F., Eskes A.** 1995. Genetic improvement of coffee for resistance to root-knot nematodes (*Meloidogyne* sp.) in Central America. In : *Seizième colloque scientifique international sur le café, Kyoto (Japon), 9-14 avril 1995*. Paris : ASIC, p.630-635. Colloque Scientifique International sur le Café. 16, 1995-04-09/1995-04-14, Kyoto, Japon.

**Bertrand B., Cattet R., Diaz J., Marban N., Morera J.** 1995. Description y estructuración de la variabilidad fenotípica del material (coffea arabica) recolectado en Etiopa por el ORSTOM. In : *XVI Simposio sobre caficultura latinoamericana. Vol. 1 y 2*. Tegucigalpa : IICA-PROMECAFE, [18 p.] p. (Ponencias, Resultados y Recomendaciones de Eventos Tecnicos, 2 vol.). Simposio sobre Caficultura Latinoamericana. 16, 1993-10-25/1993-10-29, (Managua, Nicaragua).

**Bertrand B., Vasquez N., Decazy B.** 1995. Nature of coffee resistance to two costa-rican *Meloidogyne* populations. In : Anon. *Seizième colloque scientifique international sur le café, Kyoto (Japon), 9-14 avril 1995*. Paris : ASIC, p.910-916. Colloque Scientifique International sur le Café. 16, 1995-04-09/1995-04-14, Kyoto, Japon.

**Nunez C., Bertrand B., Vargas L., Avelino J.** 1995. Estudio preliminar sobre el modo de inoculacion del hongo *Mycena citricolor* (ojo gallo) sin heridas, en la hoja del cafeto : importancia de diferentes factores que intervienen en la penetracion. In : *XVI Simposio sobre caficultura latinoamericana*. Vol. 1 y 2. Tegucigalpa : IICA-PROMECAFE. (Ponencias, Resultados y Recomendaciones de Eventos Tecnicos, 2 vol.). Simposio sobre Caficultura Latinoamericana. 16, 1993-10-25/1993-10-29, (Managua, Nicaragua).

**Bertrand B., Dufour M.** 1993. Note sur l'utilisation de la technique de microbouturage et mise au point d'une technique de microgreffage in situ chez *C. arabica* = A note about the use of microcutting and the setting up of an in situ micrografting technique for *Coffea arabica*. In : *Quinzième colloque scientifique international sur le café, Montpellier (France), 6-11 juin 1993*. Paris : ASIC, p.735-735.

**Agbodjan A.K., Bertrand B.** 1988. Bilan économique de la réponse à la fertilisation d'une caféière irriguée par aspersion au Togo = Economic assessment of the response to fertilizing of a sprinkler irrigated coffee plantation in Togo. In : ASIC. *Douzième Colloque Scientifique International sur le Café = Twelfth International Scientific Colloquium on Coffee*. Paris : ASIC, p.570-580. Colloque scientifique international sur le café. 12, 1987-06-29/1987-07-03, Montreux, Suisse.

**Agbodjan A.K., Bertrand B.** 1988. Principaux critères de sélection du *Canephora* au Togo. Résultats et perspectives = Main selection criteria for *Canephora* in Togo. Results and prospects. In : ASIC. *Douzième Colloque Scientifique International sur le Café = Twelfth International Scientific Colloquium on Coffee*. Paris : ASIC, p.483-492. Colloque scientifique international sur le café. 12, 1987-06-29/1987-07-03, Montreux, Suisse.

**Agbodjan A.K., Bertrand B., Vaast P.** 1988. Présentation des notes techniques sur les systèmes de replantation du cacaoyer au Togo. In : *Agronomie du cacaoyer*. Paris : CIRAD-IRCC. Journées agronomiques de l'IRCC, 1988-09-06/1988-09-09, (Montpellier, France).

**Bertrand B.** 1988. Note de synthèse sur un essai de mode de plantation et sur un essai d'association du cacaoyer avec des cultures vivrières. Note technique n° 1. In : *Agronomie du cacaoyer*. Paris : CIRAD-IRCC, 6 p. Journées agronomiques de l'IRCC, 1988-09-06/1988-09-09, (Montpellier, France).

**Bertrand B., Vaast P.** 1988. Note de synthèse sur la plantation avec différentes techniques d'économie en eau utilisées au Togo. Note technique n° 2. In : *Agronomie du cacaoyer*. Paris : CIRAD-IRCC, 11 p. Journées agronomiques de l'IRCC, 1988-09-06/1988-09-09, (Montpellier, France).

## PARTIE 1. VISION DE L'AUTEUR SUR LA SELECTION VARIETALE DE L'ARABICA EN AMERIQUE LATINE

### RAPPEL DU CONTEXTE SOCIO-ECONOMIQUE

Le café est la deuxième matière première exportée par les pays en voie de développement (Figure 1). Globalement l'industrie du café représenterait environ \$90-billion-par an de chiffre d'affaires ([http://www.coffeeclubnetwork.com/redes/form/post?pub\\_id=2131](http://www.coffeeclubnetwork.com/redes/form/post?pub_id=2131)). On estime que plusieurs dizaines de millions de personnes vivent de cette industrie. Par exemple, seulement en Ethiopie ;plus de 15 millions de personnes sont impliquées dans la culture , la récolte, le transport et la commercialisation. Selon les sources, 75 à 125 millions de personnes dans le monde travailleraient dans cette activité.

Deux espèces de caféiers sont cultivées, *Coffea arabica* (environ 70% de la production) et *Coffea canephora* (espèce connue commercialement sous le nom de Robusta) qui représente environ 30% de la production mondiale.

La production mondiale de café a augmenté de plus de 30% sur les 30 dernières années. L'Asie a pris une place importante en passant de 12% de la production totale en 1980 à 26% en 2010, (Figure 2). La part de l'Afrique n'a pas cessé de diminuer (21 à 13%) alors que la part de l'Amérique Latine est restée stable (65 à 62%)



Figure 1: 51 pays sont exportateurs de café. Les dix premiers pays producteurs sont indiqués en jaune. 11 100 000 Ha sont plantés de café, dont 7 100 000 Ha d'Arabica et 4 000 000 Ha de Canephora.

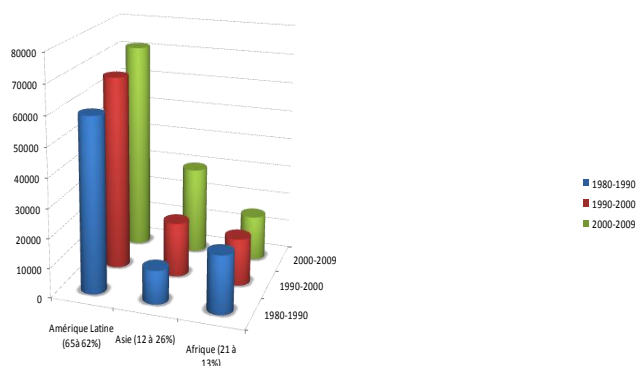


Figure 2: Evolution des parts d'exportation de café des trois principaux continents producteurs de 1980 à 2009. <http://dev.ico.org/documents/pscb-124f-report.pdf>



En pourcentage de la production mondiale la part du Robusta a augmenté passant de 25 à 33%. La production de l'Arabica se situe majoritairement en Amérique Latine (82% de la production d'Arabica) alors que la production du Robusta est très majoritairement asiatique (75% de la production du Robusta est en Asie). Le café arabica a la préférence des consommateurs ce qui explique son prix d'achat plus élevé. Sur les dix dernières années le différentiel de prix entre les deux types de café est légèrement supérieur à 2.

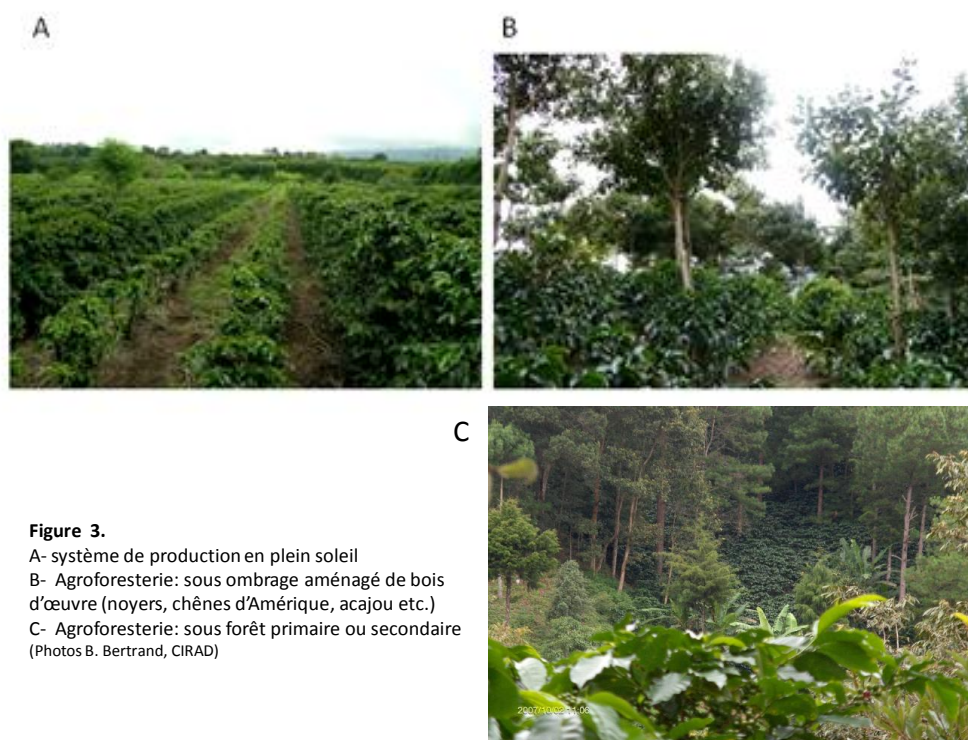
Les raisons qui expliquent la concentration de la production de l'Arabica en Amérique Latine sont nombreuses. Outre de puissantes raisons socio-économiques invoquées pour expliquer l'expansion rapide de la culture en Amérique Latine (Samper, 1999), ajoutons que l'espèce a été cultivée sur les fronts pionniers qui se développaient sur de vastes territoires vierges de montagne (Amérique Centrale et Andine) dont le climat frais était proche de celui de son aire d'origine ou sur les vastes plateaux brésiliens. En Amérique Centrale et en Colombie par exemple, cette culture est celle qui a le plus contribué à former le paysage des cordillères volcaniques.

Si les pays producteurs sont essentiellement des pays du sud, les pays du nord sont les plus gros consommateurs de café. Seulement 26 % de la production est réservée à la consommation intérieure des pays producteurs : le café est avant tout une culture commerciale d'exportation. L'Union européenne est actuellement le plus gros importateur de café (40% des importations), en particulier les pays scandinaves et les pays du nord de l'Europe. Les États-Unis représentent 22 % des importations.

Les cours du café ont toujours été très instables. Ils ont baissé de 60 % entre 1998 et 2004, entraînant une destruction massive du verger. Depuis 2004 ils ont été multipliés par 2.5 à 3 fois selon les types de qualité. Cette instabilité est due à de nombreux facteurs (accidents climatiques, excès d'offre, politiques économiques des pays producteurs...) mais aussi à la spéculation sur les cours du café.

Les raisons qui expliquent la concentration de la production en Amérique Latine sont nombreuses. Outre de puissantes raisons économiques invoquées pour expliquer l'expansion rapide de la culture en Amérique Latine (structure du foncier, main-d'œuvre abondante, échanges commerciaux etc.) (Samper, 1999), ajoutons que l'espèce a été cultivée sur les fronts pionniers qui se développaient sur de vastes territoires vierges de montagnes (Amérique Andine et Centrale) ou sur de vastes plateaux Brésiliens, dont les climats tropicaux d'altitude étaient proches de celui de l'aire d'origine de l'Arabica. En Amérique Centrale et en Colombie, cette culture est celle qui a le plus contribué à former le paysage des cordillères volcaniques.

Concernant l'Arabica en Amérique Latine, on distingue schématiquement deux systèmes de culture (Figure 3), un système très intensif principalement au Brésil (premier pays producteur qui représente 42% de la production mondiale d'Arabica) et un système moins intensif et majoritairement en agroforesterie sur les flancs des cordillères volcaniques d'Amérique Andine ou Centrale (y compris le Sud du Mexique) et des Caraïbes qui représente le même poids que le Brésil, soit 40% de la production mondiale. Il faut signaler néanmoins que deux pays échappent à cette dichotomie: la Colombie et le Costa Rica, car ils ont adopté les principes d'une caféiculture intensive avec un relief montagneux pour au moins 30-40% de la caféiculture pour la Colombie et presque 100% pour le Costa Rica.



**Figure 3.**

A- système de production en plein soleil

B- Agroforesterie: sous ombrage aménagé de bois d'œuvre (noyers, chênes d'Amérique, acajou etc.)

C- Agroforesterie: sous forêt primaire ou secondaire (Photos B. Bertrand, CIRAD)

Les systèmes agroforestiers (SAF) sont très majoritairement aux mains de petits producteurs possédant quelques hectares et pour lesquels le café constitue la source principale de revenus. Pour ces exploitants, l'usage des intrants est excessivement limité étant donné leur coût élevé. On peut considérer qu'une grande partie du café produit dans ces petites exploitations est « bio » par défaut.

## LES VARIETES DISPONIBLES

En Amérique Latine l'introduction de l'espèce s'est faite à partir d'un très faible nombre de plantes (Anthony *et al.*, 2002a. Il y a donc eu un fort effet de fondation. Cependant, cette faible diversité génétique initiale a été bien utilisée par les programmes de sélection initiés dans les années 1930, principalement au Brésil, et a donné naissance de 1950 à 1980 dans le cadre de la 'révolution verte' à une première vague de variétés adaptées à des conditions de culture intensives.

Devant le risque imminent de l'arrivée d'un nouveau pathogène (la rouille orangée)-les sélectionneurs ont développé dans une deuxième vague (1970-2000) des variétés résistantes dont les programmes d'amélioration durent encore mais dont les premières sélections ont été diffusées à partir de 1990.

A partir de la décennie 1990-2000, le marché évolue radicalement. D'une part les consommateurs souhaitent des produits diversifiés suivant l'origine, d'autre part les producteurs souhaitent créer des marchés de niche pour mieux valoriser leurs productions qui s'avèrent souvent non rentables pendant la grande crise des prix de 2001-2004. La qualité du breuvage devient alors un critère essentiel pour les sélectionneurs. Pour varier l'offre variétale, on fait appel à la diversité génétique de l'espèce. Nos travaux s'inscrivent dans cette troisième vague.

Nous allons décrire ces trois vagues de création variétale en Amérique Latine en montrant leurs avantages et leurs inconvénients.

## PREMIERE VAGUE: 1930-1980/ DES VARIETES ADAPTEES A UN SYSTEME MODERNE DE CULTURE INTENSIF

La compréhension dans les années 1930-1940 du système de reproduction autogame (i.e. autopolinisation) de l'Arabica et de sa nature polyploïde ( $2n=4X=44$ ) ont permis de débiter les travaux de génétique Mendélienne et de sélection (Krug et Mendes, 1940). L'Arabica est majoritairement autogame (85-95%) en conditions naturelles et une proportion de 5-15% provient de pollinisation croisée provoquée par le vent et les insectes. Pour les plantes autogames, la méthode classique de sélection est la sélection généalogique ('pedigree selection'). A partir d'un croisement par pollinisation artificielle, on obtient une première génération appelée F1. A partir de cette première génération les plantes sélectionnées sont soit autofécondées soit rétro-croisées avant de passer à la génération F2. Le processus d'autofécondation se répète dans les générations suivantes, jusqu'à la génération F8. A cette génération on estime qu'on a obtenu une lignée pure. Pourquoi pure ? Parce qu'on estime alors que la variabilité génétique au sein de la lignée est extrêmement faible. La durée d'une telle sélection est de 20 à 30 ans chez le caféier. Notons cependant qu'il n'existe pas de lignées totalement pures puisque, à notre connaissance, personne ne pratique l'autofécondation manuelle au-delà de la F3. Il reste donc toujours un pourcentage d'hétérozygotie non négligeable que l'on estime entre 1 à 5% chez les lignées les plus purifiées.

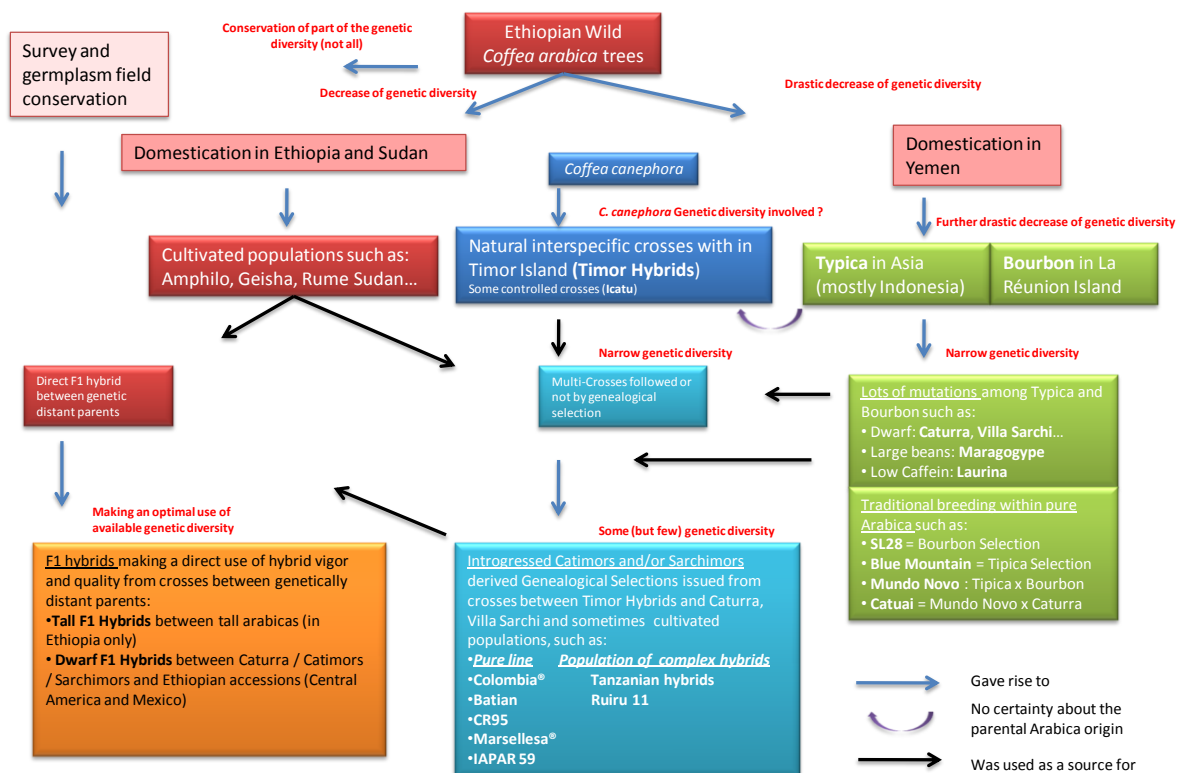
La diversité génétique initialement introduite en Amérique Latine repose sur deux populations à base génétique extrêmement étroite (Figure 4), le Typica d'une part et le Bourbon d'autre part (Anthony *et al.*, 2002a). Dans les systèmes de culture peu intensifs, les différences de productivité entre Typica et Bourbon étaient peu notables. A partir du début du siècle avec une nette accélération à partir des années 1950, il est apparu (Castillo, 1990) qu'il fallait faire évoluer les pratiques culturales. Comme pour le blé ou le maïs, grâce aux fertilisants, à l'augmentation de densité, à l'utilisation des herbicides, la culture en plein-soleil devient possible. La caféiculture en système agroforestier qui était la règle, cède la place à une caféiculture très intensive, jetant ainsi les bases d'une véritable révolution verte au Brésil, au Costa Rica et en Colombie. Cependant il apparaît très tôt que cette révolution dans les pratiques culturales doit s'accompagner également d'un changement variétal. Ainsi Carvalho *et al.* (1969) montrent dès 1961 que les différences de productivité entre diverses variétés avec ou sans ombrage s'établissent en faveur du plein-soleil et que les interactions entre variétés et systèmes de culture apparaissent particulièrement importantes.

En fait dès le début des années 40, il est apparu que la base génétique Typica, malgré des efforts de sélection ne permettait pas de grand progrès génétique alors qu'à l'inverse la sélection dans la population 'Bourbon' permettait d'assurer des progrès génétiques significatifs en culture intensive (Castillo, 1990). Au Salvador la variété Bourbon 'Tekisic' est ainsi sélectionnée. Parallèlement, Pendant les années 1930 jusqu'en 1960, les chercheurs découvrent également plusieurs mutations et en décrivent les bases génétiques (Romero, 2002). Un mutant retient particulièrement l'attention, il s'agit du Caturra. Le gène dominant Ct responsable de la mutation réduit la taille des entre-nœuds et en conséquence la taille de l'arbre. Les arbres porteurs de cette mutation sont dits de port-bas car leur taille adulte en plantation atteint 2.5-3 m contre 3-4 m pour les Arabica normaux dits de 'port-haut'.

C'est cependant la découverte du 'Borbon Amarelo' (Mendes, 1949) [qui produit plus de 40% de plus que les meilleures lignées de Bourbon] qui donne l'idée aux chercheurs de rechercher des hybrides naturels entre les

deux populations. En effet, il ressort de l'étude de Mendes que le 'Borbon Amarelo' est un hybride produit du croisement entre une mutation du Typica (cerises jaunes) avec un Bourbon à fruits rouges. A partir de cette constatation, les chercheurs développent la variété 'Mundo-Novo' qui est un hybride spontané entre le Typica 'var. Sumatra' et le Bourbon, trouvé dans l'état de Sao Paulo en 1931. Notons que le même type de variété a été crée empiriquement au Costa Rica sous le nom de cv. 'Híbrido Tico'. La variété-lignée 'Mundo Novo' est encore majoritairement cultivée au Brésil car elle permet une mécanisation de la récolte.

Là où la mécanisation n'est pas possible du fait de reliefs escarpés, c'est l'adoption de variétés de port-bas qui a permis dans les années 60-70 de profiter pleinement des principes de la Révolution Verte. Selon Castillo (1990) les variétés porteuses du gène 'Caturra' ont eu le rôle de 'catalyseur' des nouvelles pratiques culturales issues de la révolution verte en Colombie ou au Costa Rica. Au Brésil, le Caturra n' pas assez rustique, il fallut croiser le Caturra avec le Mundo-Novo pour obtenir une variété de port-nain particulièrement bien adaptée aux conditions Brésiliennes (le cv. 'Catuai'). La Figure. 4 montre que toutes ces variétés (indiquées dans des boîtes vertes sur la figure) sont issues d'une même base génétique étroite et sont en conséquence très consanguines (Anthony *et al.*, 2002a). Elles ont pourtant permis un progrès génétique important (Tableau 1) surtout parce qu'elles ont permis d'augmenter les densités de culture. On observe ainsi qu'à forte densité, l'utilisation de variétés de port-nain permet des augmentations de production allant jusqu'à 25%. L'adaptation de variétés au nouveau système de culture a donc été particulièrement efficace et a eu un impact important.

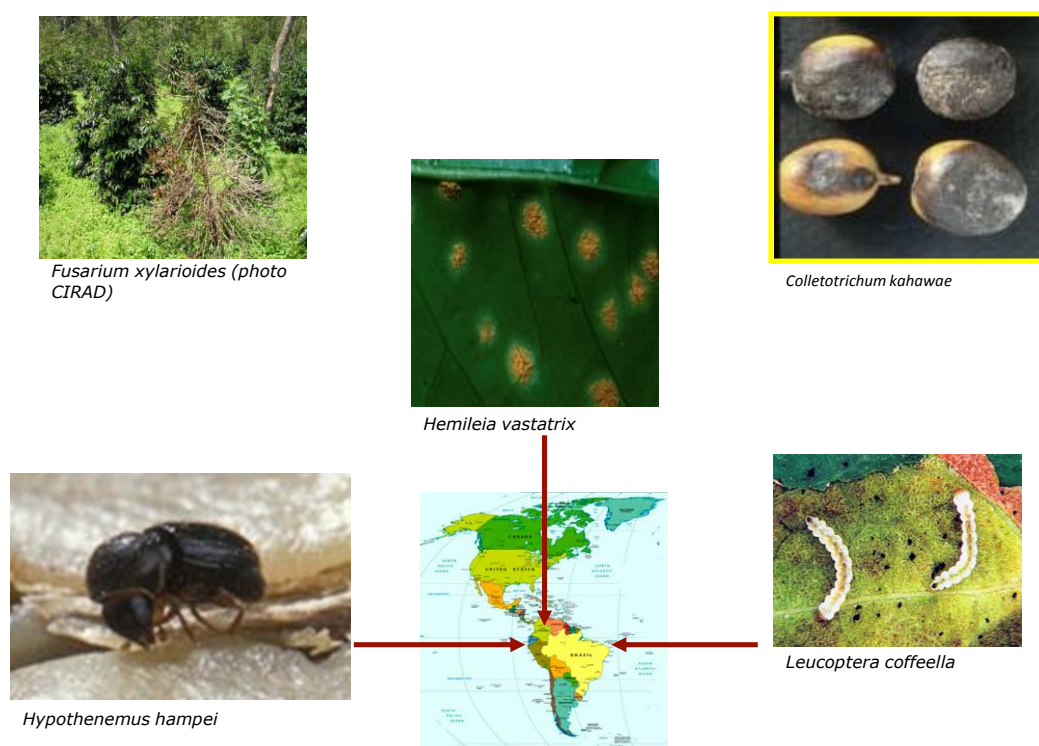


**Figure 4.** Généalogie des principales variétés de café Arabica

tiré de Specialty Coffee, Managing quality, Edited by T Obertür, P Laderäch, H.A. Pohlen and J Cook. Chapitre 2.2 Breeding for coffee quality by Christophe Montagnon, Pierre Marraccini & Benoit Bertrand; en cours d'édition.

## AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES VARIETES ISSUES DE LA PREMIERE VAGUE DE LA REVOLUTION VERTE

**Inconvénients** : Du fait de la faible base génétique de ces variétés, leur principal défaut réside dans l'absence d'allèles de résistance aux principales maladies, c'est-à-dire à la plupart des races de rouille, aux nématodes d'Amérique Latine et au *Colletotrichum kahawae* (CBD), une maladie fongique des grains que l'on trouve exclusivement en Afrique pour l'instant, (Figure 5).



**Figure 5** : les flèches en rouge indiquent les principales maladies ou insectes inféodés aux caféiers qui ont été introduits d'Afrique en Amérique Latine . L'absence de flèches indiquent les deux principales maladies qui n'existent pas en Amérique Latine mais pour lesquelles il est important de créer des variétés résistantes, pour se préparer à une entrée accidentelle.

**Avantages** : A l'origine l'arabica est une plante de sous-bois. La plupart des arbres 'sauvages' d'Ethiopie sont de fait peu adaptés à la culture en plein-soleil. L'une des premières innovations amenée par les premiers caféiculteurs (sans doute au Yemen vers le 14<sup>ème</sup> siècle, Pendergrast, 2002) a été la culture en plein-soleil. Les meilleures lignées de Bourbon et les variétés dérivées (Caturra, Mundo-Novo, Catuai) sont particulièrement bien adaptées à la culture en plein-soleil.

En ce qui concerne la qualité du breuvage, le marché considère généralement que le Bourbon est supérieur aux variétés dérivées Caturra ou Catuai. En réalité les différences que le marché attribue à la variété sont confondues avec celles du système de culture. Il est ainsi vrai de dire que le Bourbon en système extensif d'agroforesterie donnera un breuvage de meilleure qualité (plus acide et peut-être plus fruité) que celui du Caturra cultivé à la même altitude en système intensif. Ce constat n'a cependant pas de base génétique. Lorsque les conditions de culture sont les mêmes, les deux variétés sont strictement équivalentes (communication personnelle, données non publiées).

Quel que soit le système de culture, on doit considérer que les variétés Caturra, Catuai, Mundo Novo, du fait de leur poids majoritaire dans le verger, représentent le standard et que n'importe quelle nouvelle variété doit leur être *a minima* égale pour la qualité du breuvage.

## DEUXIEME VAGUE: 1970-2000/DES VARIETES RESISTANTES AUX MALADIES

L'arrivée de la rouille orangée sur le continent Américain en 1970 au Brésil (1981 au Mexique, 1983 au Costa Rica et en Colombie) a été immédiatement prise en compte par les sélectionneurs. En effet, depuis le 19<sup>ème</sup> siècle on connaissait des sources de résistance à la rouille (Kushalappa et Eskes, 1989) mais surtout depuis 1955 grâce aux travaux du CIFC (Centro de Investigação da Ferrugem do cafeeiro), un hybride interspécifique spontané, (**Hybride de Timor**) issu du croisement entre *C. arabica* et *C. canephora* (Bettencourt, 1973) s'était révélé hautement résistant à toutes les races de rouille connues. Actuellement l'hybride de Timor est à la base de presque toutes les variétés résistantes à la rouille en Amérique Latine. Ces variétés dérivées de l'Hybride de Timor sont appelées 'Catimors' ou 'Sarchimors' ou 'Colombia' ou 'Castillo'.

Au Brésil, des hybrides interspécifiques artificiels du même type que l'Hybride de Timor ont été créés artificiellement et ont donné naissance à des variétés résistantes appelées 'Icatu'.

Les schémas de sélection basés sur les hybrides interspécifiques consistent à récupérer les gènes de résistance de l'Hybride interspécifique dans le fond génétique d'une variété arabica issue de la révolution verte. Tout d'abord l'Hybride est croisé en général avec une variété de port-nain, puis éventuellement rétro-croisé (Fig. 4, boîtes bleues). Débute alors une sélection généalogique qui consiste à revenir vers le type parental arabica tout en conservant le maximum de gènes de résistance provenant de l'Hybride interspécifique. Les gènes provenant de l'Hybride interspécifique sont dits 'introgressés' (Anthony et al., 2002b). Ces schémas sont un peu plus longs que les schémas de sélection généalogique intraspécifiques. Ils sont en revanche plus onéreux (l'intensité de sélection est importante) et plus aléatoire.

Plusieurs variétés obtenues suivant ce schéma sont actuellement en cours de diffusion. Citons par exemple IAPAR59, diffusé au Brésil, ou la variété Colombia Castillo® en Colombie, une variété multi-lignées, ou très récemment par l'auteur la variété Marsellesa® au Nicaragua et Mexique.

### AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES VARIETES DERIVEES DE L'HYBRIDE DE TIMOR

Les avantages des lignées dérivées de l'Hybride de Timor quand elles ont été soigneusement sélectionnées (ce qui n'a pas toujours été le cas) résident dans leur haut niveau de résistance à plusieurs races de rouille (Castillo, 1990). Ceci se traduit par une hausse de productivité estimée à environ 25% dans des essais sur stations. En réalité, maintenant que les variétés ont été diffusées massivement, on estime cette hausse de production plutôt aux alentours de 15% (observation de l'auteur après analyses de plusieurs dizaines 'd'essais' chez les producteurs). La résistance à la rouille présente l'avantage considérable de diminuer voire de supprimer totalement les traitements chimiques contre la rouille.

Par ailleurs, la sélection n'ayant pas été assistée avec des marqueurs moléculaires, il s'avère que la plupart des lignées dérivées de l'Hybride de Timor conservent une part non négligeable du génome de *C. canephora* (Lashermes et al., 2000). Les fragments chromosomiques conservés peuvent dans certains cas porter également des gènes de résistance aux nématodes ou au CBD (Noir et al., 2003 ; Gichuru et al., 2008) mais en contrepartie amener des baisses de qualité à la tasse (Bertrand et al., 2003).



### TROISIEME VAGUE: 1990-2010/ DE NOUVELLES VARIETES POUR UNE AGRICULTURE ECOLOGIQUEMENT INTENSIVE.

L'organisation Internationale du café reconnaît trois catégories de café arabica: cafés doux de Colombie, autres doux et naturels du Brésil. La fixation des prix est d'abord basée sur ces trois grandes catégories qui ne sont aucunement basées sur les variétés. Cependant, à l'intérieur de chacune d'entre elles des distinctions sont encore faites sur l'origine géographique (région de production ou altitude de production) ou sur des procédés particuliers de culture ou de post-récolte. La préoccupation majeure du marché est principalement de se procurer une qualité constante pour réaliser des mélanges ('blends') qui constituent des marques commerciales auxquelles sont attachées les consommateurs. Comme nous l'avons observé (Bertrand *et al.* 2006b), les torréfacteurs ont forcément une attitude conservatrice vis-à-vis d'éventuelles modifications dans la qualité des cafés qu'ils achètent.

Toutefois, la situation a beaucoup évolué les dix dernières années avec la croissance à deux chiffres du marché des cafés dits 'spéciaux' (Giovannucci *et al.*, 2008). Le marché des cafés spéciaux a été décrit comme une 'decommoditization' du marché (Daviron et Ponte, 2005). Sur ce nouveau marché certains cafés, différenciés suivant les origines géographiques ou les terroirs et/ou suivant le mode de production ou de commercialisation (équitable, bio, etc.), et/ou pour leur qualité intrinsèque trouvent acquéreur auprès de consommateurs avertis.

La croissance de ce marché de spécialité a eu deux conséquences contradictoires sur la perception du facteur variétal par le marché. D'une part, il est apparu que des variétés du type 'Catimors' pouvaient présenter des défauts sensoriels non négligeables (Bertrand *et al.*, 2003). Mais en contrepartie, il est apparu qu'il était également possible de faire mieux que les variétés 'standard' en matière de qualité du breuvage, ce qui a mis en lumière l'importance de revisiter la diversité génétique au sein de l'espèce et les interactions génotype-environnement et traitements post-récolte.

Dans le même temps qu'a crû la demande en cafés de très haute qualité, la crainte de manquer d'approvisionnement s'est répandue parmi les négociants et les torréfacteurs. Depuis cette crainte se renforce par des évidences de plus en plus nombreuses de l'impact de plus en plus marqué du changement climatique sur la durabilité économique et écologique des systèmes de culture. Inondations, sécheresses, gelées, il y a peu d'années sans crise climatique et chaque fois avec des conséquences négatives sur l'offre. La baisse de l'offre entraîne une hausse continue des cours mais également une baisse de l'intérêt des producteurs qui se détournent de la culture du café pour d'autres types de production mieux adaptées aux risques climatiques. Après avoir réalisé récemment que la qualité du breuvage devenait un facteur clé, les acteurs de la filière ont maintenant pris conscience que la productivité est un facteur essentiel. L'entreprise 'Nespresso' a récemment inventé le néologisme de *quality*™ pour décrire ce nouveau paradigme qui consiste à produire qualité et quantité.

Chez les plantes allogames comme le maïs, le progrès génétique est basé sur l'exploitation de l'hétérosis. Rompant avec le schéma traditionnel de la sélection généalogique, plusieurs chercheurs ont proposé à partir des années 1980 de créer des variétés hybrides F1 d'Arabica (Charrier *et al.*, 1978 ; Walyaro *et al.*, 1983). Les variétés hybrides sont proposées quand i) l'hybride permet l'accumulation immédiate dans un génotype de gènes favorables qui se trouvent chez des génotypes complémentaires, ii) lorsque existe le phénomène de vigueur hybride (hétérosis). Chez les plantes autogames, la voie hybride est plus rare que chez les allogames car les phénomènes d'hétérosis sont de plus faibles intensité. Cependant chez l'arabica des travaux pionniers établissent une vigueur hybride de 20 à 30% (Charrier, 1978). D'autre part, Charrier (1985) ou Van der Vossen (2001) ont noté la complémentarité de certaines populations de caféiers en ce qui concerne la résistance aux maladies.

A partir de ces constats j'ai proposé un schéma de sélection pour l'Amérique Latine (Fig 4, boîte orange), fondé sur l'inter-croisement de trois pools de matériel génétique (les cultivés de port-nains arabicas, les cultivés de port-nains introgressés (dérivés de l'Hybride de Timor), les caféiers 'sauvages' d'Ethiopie ou du Soudan.

Outre les deux hypothèses déjà évoquées (i.e., vigueur hybride et complémentarité pour les résistances) qui sous-tendaient le succès d'une création variétale basée sur l'intercroisement de ces trois pools il fallait démontrer parallèlement qu'il pouvait exister des méthodes de propagation massale peu coûteuses pour diffuser les variétés hybrides. Une méthode de micropropagation basée sur l'embryogenèse somatique a donc été développée par mon équipe.

Aujourd'hui, après plusieurs années d'expérimentations en milieux contrôlés ou chez les producteurs, mes travaux ont démontré que les hybrides F1 produisent de 30-60% de plus que les meilleures lignées. Cette performance est acquise sans apport supplémentaire d'engrais. Lorsque les hybrides proviennent du croisement complémentaire d'une lignée dérivée de l'Hybride de Timor par un Ethiopien, il est possible de sélectionner aisément des clones présentant de bons niveaux de résistance à la rouille orangée, aux nématodes comme au CBD. Enfin, la qualité générale des hybrides les situent au même niveau de qualité 'standard' que le Caturra ou le Catuai. Dans certains cas et dans des environnements particuliers, on note même une qualité aromatique très supérieure à celle des variétés 'standards'.

En 2003, les informations étaient suffisantes pour tester à une échelle significative la voie hybride. Un transfert de technologie a donc eu lieu de 2003 à 2010 avec un partenaire privé aboutissant à la mise en place de deux laboratoires de micropropagation par embryogenèse somatique au Nicaragua et au Mexique. Les premières commercialisations de plus de deux millions de plantes ont eu lieu (en 2009 et 2010).

## LES CONDITIONS DE DIFFUSION DU PROGRES GENETIQUE

Les variétés d'origine Typica et Bourbon sont encore très cultivées en agriculture familiale en Amérique Andine et en Amérique Centrale. Pour des raisons socio-économiques qui sont liées à la faible taille des exploitations, à la difficulté d'accès au crédit, au manque d'information, mais aussi à une très bonne durabilité des systèmes agroforestiers, beaucoup de producteurs n'ont pas su (voulu, ou pu) basculer vers des systèmes intensifs. Dans ces systèmes peu intensifs, l'avantage comparatif des variétés type «Révolution Verte» est inexistant. Le problème est que beaucoup de producteurs rénovent leur verger avec leur propre semence. Au fil des années, on assiste à une perte importante de pureté variétale.

Les variétés Caturra et Catuai ainsi que les nouvelles variétés dérivées de l'Hybride de Timor font l'objet de programmes de multiplication dans un petit nombre de pays. Au Costa Rica, au Honduras, en Colombie, au Brésil par exemple, des organismes étatiques ou coopératifs distribuent au prix de production (environ deux fois le prix du kilo de café à l'exportation) des semences de très bonne qualité germinative et d'une pureté variétale, qui si elle n'est pas parfaite, est du moins proche de 90-95%. Il faut signaler que ces prix sont très largement subventionnés et ne couvrent pas les coûts de production réels qui devraient tenir compte de la recherche, du marketing et de la distribution. Dans les autres pays, les producteurs se tournent vers des producteurs de semences non certifiés dont le principal argument de vente porte sur la capacité germinative et non sur la pureté variétale.

Très peu de variétés (3 à notre connaissance), même les plus récentes, ont fait l'objet de dépôt de brevet ou de demandes de reconnaissance auprès de l'UPOV (Union pour la protection des obtentions végétales ([http://www.upov.int/index\\_fr.html](http://www.upov.int/index_fr.html))). Beaucoup de variétés n'ont donc pas de propriétaires et sont donc de libre accès. C'est par exemple le cas de la variété CR95. Etant de libre accès, cette variété est actuellement propagée par n'importe-qui et sans préoccupation de la pureté variétale. La variété T5175 constitue un autre



exemple intéressant. Cette lignée écartée pendant le cycle de sélection par l'ICAFE du Costa Rica a été diffusée sans aucune autorisation en Amérique Centrale. Actuellement elle continue d'être propagée alors que la qualité du café produit est largement inférieure à celle du standard Caturra. Il existe de nombreux cas comme celui-ci. Aucun catalogue n'existe et les réglementations lorsqu'elles existent ne sont pas respectées. Enfin les informations qui parviennent aux producteurs sont insuffisantes, voire erronées.

Les producteurs qui se procurent des semences hors des systèmes certifiés courent alors un quadruple risque : i) ne pas se faire conseiller la bonne variété pour son écologie ii) acheter des semences de mauvaise capacité germinative iii) acheter des semences hétérogènes (manque de pureté variétale) iv) acheter une variété qui produit un café de qualité inférieure au standard ou dont la productivité est largement inférieure au standard.

Dans les rares pays qui ont organisé une production de semences sous contrôle d'instituts, on dispose de quelques chiffres de volume de diffusion des semences. Au Costa Rica par exemple, ce sont suivant les années de 5 à 25 tonnes de semences qui sont commercialisées à prix coûtants par l'Instituto del café (ICAFE). En Colombie, ce sont plus de 80 tonnes. Actuellement le prix de vente d'un kilo de semences est d'environ 8-10 USD. Dans un kilo de semences, on estime qu'il y a environ 3000 graines et que 80% germeront utilement. Pour rénover un hectare de verger (la densité de culture oscille entre 3000-6000 arbres/ha) un producteur devra utiliser entre 1.5 et 3 kilos de semences. Le coût de la semence est donc négligeable (inférieure à 30 USD /HA) qu'il faut comparer aux plus de 3000 USD/ha pour la mise en œuvre des vergers. Le coût des semences est donc extrêmement faible pour le producteur, d'autant qu'il peut à loisir s'auto-approvisionner dès la 3ème année. L'analyse de la situation socio-économique montre ainsi que la commercialisation de semences n'est pas rentable pour les entreprises semencières privées, qui de ce fait ne s'investissent pas du tout dans la recherche (à l'exception notable de Nestlé).

Aucune statistique fiable n'existe sur les semences de café Arabica au niveau international. On peut tenter de faire quelques estimations. En considérant un taux de renouvellement du verger entre 2 à 5% par an pour le Brésil, la Colombie et le Costa Rica, ce sont 250 à 500 millions d'arbres qui sont renouvelés chaque année dans les systèmes intensifs. Pour les SAF les taux de renouvellement sont beaucoup plus faibles (0.5-2%) et l'estimation porte sur une fourchette de 140 à 560 millions d'arbres par an. Lorsque les prix du café s'envolent, on peut donc estimer que ce sont plus d'un milliard d'arbres qui sont renouvelés. Lorsque les cours baissent, le renouvellement ne dépasse pas 300-400 Millions selon mes estimations. Pour espérer avoir un impact important au niveau continental avec les hybrides F1, il faudrait produire au moins 100 millions de plantes/an. Reproduite sous forme de clones d'hybrides reproduits par embryogenèse somatique, cela nécessiterait une automatisation des processus de fabrication ce qui nécessitera de nombreuses mises au point. Sous forme de semences F1 en utilisant la stérilité mâle cela représente 50 à 100 ha de champs semenciers. Un objectif qui semble très réalisable.

## LA RECHERCHE EN GENETIQUE ET EN GENOMIQUE ET LES PROGRAMMES DE CREATION VARIETALE

Comparé à d'autres plantes tropicales, on ne peut pas prétendre que le café est une plante orpheline. La communauté scientifique travaillant sur l'amélioration des plantes représente plusieurs centaines de chercheurs. Les outils mis au point permettent d'envisager des recherches de pointe dans tous les domaines de la génétique moderne. Les ressources génétiques commencent à être bien connues. Le séquençage du génome du café est en cours. La transformation génétique est au point, la régénération par embryogenèse somatique fonctionne. Plusieurs gènes d'intérêt agronomiques sont bien connus, etc..

Malheureusement, la communauté n'est pas assez importante et trop divisée pour créer une dynamique internationale de grande portée autour de l'amélioration de l'espèce qui pourrait de surcroît proposer la préservation des ressources génétiques menacées en Ethiopie. D'autre part, il y a encore peu de contact entre les biologistes moléculaires et les sélectionneurs. On peut affirmer que pour l'instant aucune variété n'est issue des outils de la génétique moderne.

Les vrais programmes de sélection variétale de l'Arabica sont peu nombreux. Le Brésil a été précurseur dès les années 1930 suivi par la Colombie. Actuellement ces deux pays font l'essentiel de la création variétale dans le monde. Au Kenya et en Tanzanie d'importants efforts ont été faits également à partir des années 50. Aujourd'hui ces programmes sont peu dynamiques. En Ethiopie, beaucoup d'efforts ont été réalisés mais faute de moyens ne se traduisent pas par de la diffusion efficace. Finalement l'Amérique Centrale et l'Amérique Andine ont bénéficié des programmes menés ailleurs en Amérique Latine. Ce n'est que récemment avec le programme que j'ai développé avec le CATIE et PROMECAFE qu'une véritable création variétale a été menée dans cette région. Dans le secteur privé, il n'y a guère que Nestlé qui après avoir investi le champ de l'amélioration du *C. Canephora*, est en train de devenir un acteur important dans la sélection variétale de l'Arabica.

## PARTIE 2: MISE EN EVIDENCE DE L'HETEROSIS & DEVELOPPEMENT DES VARIETES HYBRIDES D'ARABICA (TRAVAUX DE RECHERCHE DE 1990-2010).

### RAPPEL DES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DE L'ESPECE

#### *Un allotetraploïde récent*

Parmi les 104 espèces de *Coffea* décrites, toutes sont diploïdes ( $2n=2x=22$ ) et auto-incompatibles à l'exception de *C. arabica* qui apparaît comme étant la seule espèce tétraploïde ( $2n=4x=44$ ) et autogame. Des analyses moléculaires (Lashermes *et al.*, 1999) ont montré que l'espèce est un allopolyploïde qui résulte de l'hybridation entre *C. eugenioides* (E génome) et *C. canephora* (C génome) ou d'écotypes proches de ces espèces.

La diversification des *Coffea*, sous-genre *Coffea* s'est probablement produite dans la seconde moitié du moyen Pléistocène (450000-1000000 avant notre ère), et il est probable que la spéciation de l'allopolyploïde se soit produite dans des temps récents (10000-30000 ans) (Cenci *et al.*, 2010).

En comparaison avec d'autres angiospermes les génomes des espèces du genre *Coffea* sont plutôt de petites tailles, (810 Mb pour *C. canephora* et 1300 Mb pour celui de *C. arabica*). Lashermes *et al.* (2010) observent une faible divergence entre les deux sous-génomes constitutifs de *C. arabica* ( $E^a C^a$ ) et ceux des espèces parentales est observée. Une divergence moyenne  $1.30\% \pm 0.67$  a été estimée entre *C. canephora* (C génome) et le sous génome dérivé de *C. eugenioides* ( $E^a$ ) chez *C. arabica* (Figure 6).

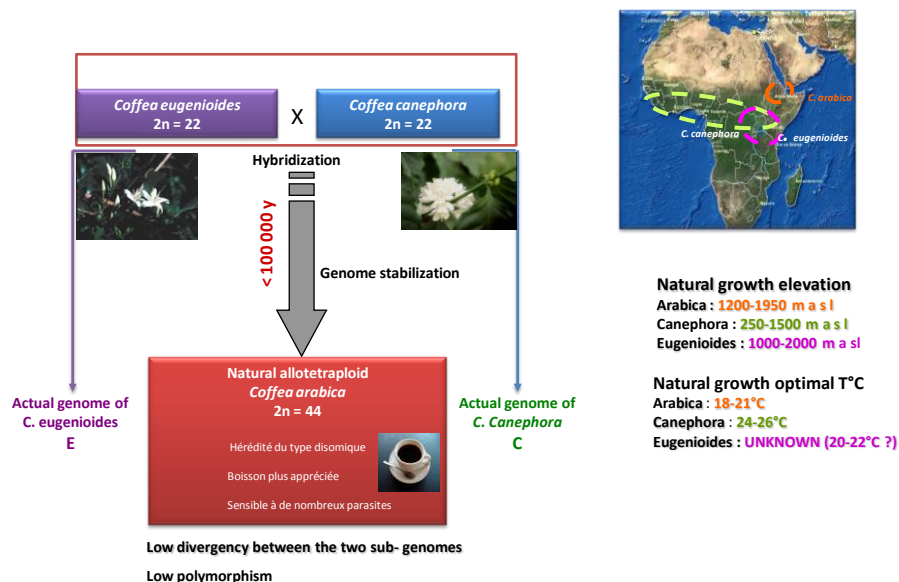


Figure 6 : Nature allopolyploïde de *C. arabica* et divergences observées avec les génomes parentaux.  
Les zones de diversité sont indiquées sur la carte d'Afrique. Les exigences écologiques sont également indiquées.

#### *Une hérédité disomique*

L'espèce *C. arabica* présente un comportement méiotique comparable à celui des espèces diploïdes avec la formation prépondérante de bivalents (Grassias, 1980). Le mode d'hérédité disomique a été établi par P Lashermes *et al.*, (2000), par l'analyse à plusieurs locus RFLP, des ségrégations au sein d'une population F2. A la méiose, les chromosomes homologues s'apparient de façon systématique pour former des bivalents.

### *Une faible diversité génétique originaire d'une petite région*

*C. arabica* montre peu de diversité génétique et s'est développé principalement dans le Sud-Ouest de l'Éthiopie (Figure 7). Il existe également une région Soudanaise montagneuse le plateau de Boma dans laquelle on trouve également des caféiers arabica sauvages. Cette région a été insuffisamment prospectée. Les accessions sauvages qui en sont issues sont connues comme Rume Sudan et Barbuk Sudan (Figure 7). Signalons le Mont Marsabit au Kenya (Anthony *et al.*, 1987) qui pourrait également être un centre de diversité primaire ou secondaire.

Il existe finalement un centre de diversité secondaire au Yémen où le café a été introduit vraisemblablement aux alentours du 6<sup>ème</sup> siècle selon certains auteurs (Wellman, 1961; Kushalappa et Eskes, 1989) ou au 14-15<sup>ème</sup> siècle suivant Pendergrast (2002).



**Figure 7 :** Carte d'Éthiopie montrant en vert les zones de culture du caféier. Les zones de diversité primaire sont indiquées à l'intérieur du cercle. Photo du Plateau de Boma dans le Sud Soudan. Le Plateau de Boma est une zone de diversité primaire encore très mal connue, dont sont issues les accessions Rume Sudan et Barbuk Sudan. (Photo, courtoisie Tim Schilling, Borlaug Institute)

### *Une plante de sous-bois adaptée aux zones tropicales 'fraîches'*

L'arabica est natif des forêts tropicales des plateaux Abyssinien, à des altitudes de 1200–1950 m, avec une température moyenne de 18–21°C (Figure 6). Le caféier arabica est typiquement une espèce de sous-bois. La plupart des arbres 'sauvages' sont sévèrement stressés lorsqu'ils sont cultivés en plein-soleil (Van der Vossen, 1985).

### *Une espèce dont la diversité génétique est menacée*

La diversité génétique naturelle de l'espèce est gravement menacée en Éthiopie. Le facteur qui contribue le plus à l'érosion génétique est la déforestation (Labouisse *et al.*, 2008). Un autre facteur cité par ces auteurs, est le remplacement des races locales par des variétés plus productives mais à base génétique étroite.

### *Une semence non orthodoxe*

Les semences de café n'ont pas un comportement orthodoxe lorsqu'elles sont déshydratées ou stockées à des températures ambiantes ou faibles (de 20°C à 5°C). La viabilité des graines décroît rapidement après 4-6 mois à

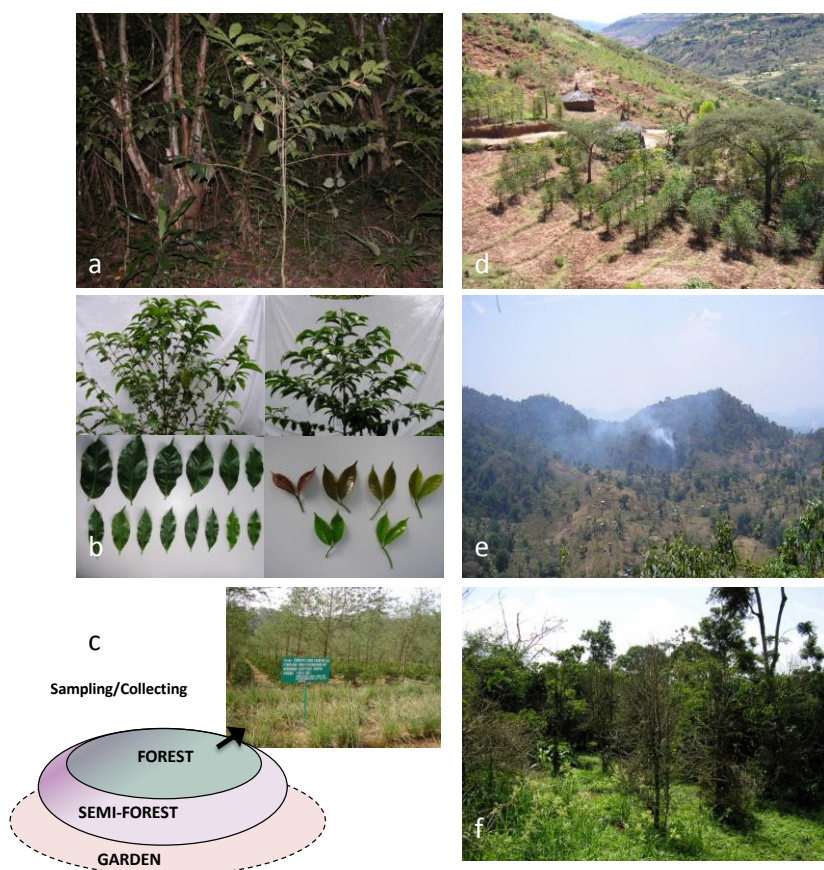
température ambiante. Cependant un stockage à long terme est possible en adaptant et en contrôlant les conditions de stockage (Eira *et al.*, 2006).

### Les Collections *ex-situ*

Les premières collectes de caféiers en Éthiopie ont été entreprises, de façon sporadique et limitée, par des explorateurs, des militaires, des marchands ou des botanistes à partir du milieu du 19<sup>ème</sup> siècle (Sylvain, 1958; Meyer, 1965). En 1964-1965 une mission internationale mandatée par la FAO collectait 621 échantillons de caféiers (individus ou populations) dans les principales zones de culture d'Éthiopie (Meyer *et al.*, 1968). En 1966, une mission de l'ORSTOM (actuel IRD) collectait 61 individus ou populations principalement dans les forêts à caféiers du sud-ouest du pays (Guillaumet et Hallé, 1967). Les échantillons collectés ont été répartis entre plusieurs institutions en Afrique, Asie, et Amérique Latine (Anthony *et al.*, 2007) et, pour une partie d'entre eux, ont fait l'objet d'études de diversité à partir des caractères phénotypiques (Meyer *et al.*, 1968; Charrier, 1978; Montagnon et Bouharmont, 1996) et par l'utilisation de marqueurs moléculaires (Anthony *et al.*, 2001; Silvestrini *et al.*, 2007).

En Éthiopie, des prospections systématiques ont permis de constituer une collection nationale de caféiers (JARC, Jimma Agricultural Research Center) qui comporte 4780 accessions en 2006 (Labouisse *et al.*, 2008). Depuis 1985, une deuxième collection de 5196 accessions principalement collectées en forêt est aussi conservée par l'IBC (*Institute of Biodiversity Conservation*).

Les collections *ex situ* conservées au champ sont soumises à une érosion génétique qui, en Éthiopie, est principalement provoquée par la trachéomycose (Figure 8) et un dépérissement physiologique (*die-back*) dû à des pratiques culturales inadéquates ou à l'inadaptation aux conditions écologiques du site de conservation. En Éthiopie (JARC), le taux d'érosion a ainsi été estimé à 0.6 % l'an (Labouisse *et al.*, 2008), alors que Anthony *et al.* (2007) ont estimé les pertes dans la collection du CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y de Enseñanza) au Costa Rica à 0.4% par an.



**Figure 8:** *C. arabica* en Éthiopie. une grande diversité génétique (photos a, b), menacée principalement par la déforestation et la sécheresse (photo d), la pression démographique et les feux de forêt (photo e) et les maladies (ici *fusarium xylarioides*) - photo f-. Les autorités Éthiopiennes préservent une partie des RG en collections *ex-situ* (photo c) en prélevant les RG dans les forêts (ce qu'il en reste), les plantations semi-forestières (de moins en moins importantes) et les jardins caféiers. Tiré de Labouisse *et al.*, 2008. Photos JP labouisse, Cirad.



*Une importante variabilité phénotypique mais une faible diversité génétique.*

L'examen des collections ex-situ ou des caféiers sauvages *in situ* révèle une variabilité importante (Figure 8). Les études moléculaires sur la base de plusieurs types de marqueurs révèlent cependant une variabilité génétique réduite en comparaison avec la variabilité observée chez *C. canephora*. Une analyse moléculaire (Anthony *et al.* 2002a) montre un très faible polymorphisme dans les deux populations introduites et cultivées historiquement en Amérique Latine, le Typica et le Bourbon. Le polymorphisme sur la base de marqueurs AFLP ou microsatellites s'est révélé un peu plus important chez les caféiers sauvages d'Éthiopie.

*La sensibilité aux maladies et aux parasites: une contrainte agronomique majeure chez l'Arabica*

Les principales contraintes phytoparasitaires sont décrites dans la figure 5. Dans de nombreuses régions de production, et plus particulièrement au Brésil et en Amérique Centrale, les nématodes à galles du genre *Meloidogyne* constituent une contrainte agronomique majeure (Figure 9). Plus d'une quinzaine d'espèces ont été décrites dans le monde comme parasite du caféier et 7 espèces (*M. exigua*, *M. incognita*, *M. paranaensis*, *M. arabicida*...) sont communément observées en Amérique Latine. L'impact de leurs attaques est considérable, et peut aller d'une baisse importante du rendement (de l'ordre de 15% dans le cas de *M. exigua*) à la mort de l'arbre et un abandon de la caféiculture (*M. arabicida* ; *M. incognita* du Guatemala). Des sources de résistance ont été identifiées au sein des formes sauvages de l'espèce mais également au sein des ressources génétiques que constituent les espèces diploïdes de caféiers ( $2n=2x=22$ ) et les formes sauvages de *C. arabica*.



**Figure 9:** Les nématodes constituent une contrainte agronomique majeure pour la culture du caféier arabica  
a) Nématode à galles (ici *Meloidogyne exigua* sur racines de caféiers; b) arbres de 3-4 ans, infestés par *Pratylenchus* spp au Guatemala (photos, L. Villain UMR RPB)

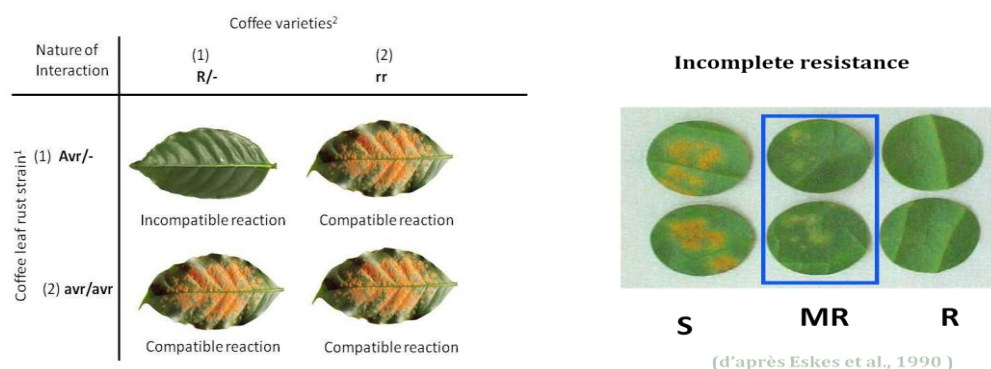
Les nématodes 'brouteurs' du genre *Pratylenchus* spp sont également fréquemment trouvés sur les racines de caféier. Il est fréquent d'observer des populations mixtes de *Meloidogyne* et *Pratylenchus* comme nous l'avons montré (Hervé *et al.*, 2005). Les *Pratylenchus* dans certaines conditions de sols peuvent provoquer des dégâts considérables (Figure 9). Les arabicas ne sont pas tolérants aux *Pratylenchus* alors que les Robusta présentent une certaine résistance.

La rouille du caféier (*Hemileia vastatrix*) est considérée comme la principale maladie fongique du caféier. La rouille est présente dans toutes les zones de culture (à l'exception de l'Australie et de Hawaï, Van der Vossen *et al.*, 2005). Elle est endémique dans le centre de diversité primaire de l'Arabica. On lui attribue des pertes de récolte de plus de 30% au Brésil dans des systèmes en plein-soleil ou dans les régions où la température moyenne est supérieure à 20-21°C. En système agroforestier en Amérique Centrale et à des altitudes supérieures à 1100 m la rouille n'est pas un problème majeur. A 1100 m nous avons estimé que les pertes atteignaient 15% environ (données de l'auteur, non publiées). Aux altitudes les plus élevées (>1300 m en Amérique Centrale), les pertes sont quasi nulles et le déploiement de cultivars résistants n'est pas nécessaire.

L'utilisation de cultivars résistants est considérée comme la méthode de contrôle la plus efficace et la plus économique. Des sources de résistance au pathogène existe dans l'espèce ou en interspécifique. Leur

exploitation est considérée comme essentielle pour l'amélioration génétique de la résistance des variétés de *C. arabica* (Charrier et Eskes 1997).

L'interaction café-rouille semble suivre un modèle de Flor (1971) dans lequel 'pour chaque gène conditionnant la résistance chez l'hôte, il existe un gène spécifique conditionnant la virulence chez le pathogène' (Figure 10). La résistance à la rouille serait due à 9 gènes dominants majeurs (nommés  $S_H1$  à  $S_H9$ ) qui seuls ou en association conditionnent la sensibilité totale aux races de rouille. L'espèce Arabica est porteuse des gènes  $S_H1$ ,  $S_H2$ ,  $S_H4$  et  $S_H5$  (Figure 24). Ces gènes de résistance ont été déployés dans des cultivars d'Arabica mais ont été rapidement surmontés par des races de rouille. L'amélioration s'est tournée vers des gènes de résistance provenant de l'Hybride de Timor.



**Figure 10:** Quadratic diagram illustrating the gene-for-gene interaction between host resistance ( $S_H1$  to  $S_H9$ ) genes and rust avirulence ( $V1$  to  $V5$ ) genes in the coffee-rust relation. Incomplete resistance frequently observed on wild arabica could confer a durable resistance, but only if based on many genes.

L'hybride de Timor apporte quatre gènes de résistance ( $S_H6$ ,  $S_H7$ ,  $S_H8$  et  $S_H9$ ) (Figure 24). Ces gènes ont été introgressés dans des fonds génétiques de variétés améliorées (figure 4, boîte bleue et figure 24). Les gènes  $S_H$  étant dominants, leur utilisation est aisée même à l'état hétérozygote (Kushalappa et Eskes, 1989). En plus de ces gènes, il est vraisemblable qu'il existe aussi des gènes mineurs qui conditionnent la relation hôte-parasite (figure 10).

Le *colletotrichum kahawae* est une maladie fongique qui sévit uniquement en Afrique. Elle y cause des pertes de récolte très importantes dans les climats les plus frais. La résistance génétique du caféier apparaît très élevée chez *C. canephora* et partielle chez *C. arabica*. Des études développées par Van der Vossen (1985) concluent que la résistance au CBD apparaît contrôlée par au moins deux gènes majeurs chez l'arabica (gène  $R$  et  $K$ ). L'hybride de Timor amène au moins un gène de résistance (le gène  $T$ ). De récentes études menées par notre équipe (Gichuru *et al.*, 2008) ont identifié un gène majeur ( $C_k-1$ ) conférant un bon niveau de résistance très probablement synonyme du gène  $T$  décrit antérieurement. Des lignées porteuses de ce gène s'avèrent très résistantes au champ en conditions de fortes épidémies (pertes de seulement 15-20% pour la lignée porteuse du gène contre plus de 80% pour la lignée non porteuse). En Ethiopie, plus d'une vingtaine de lignées de pur Ethiopien issues d'un programme de sélection basé sur des 'landraces' ont été sélectionnées et montrent un bon niveau global de résistance (Belachew, 1997).

Des marqueurs de la résistance au nématode *M. exigua* au CBD et à la rouille (pour le gène  $S_H3$ ) ont été développés par notre équipe. Ces marqueurs sont d'ores et déjà utilisés au sein des lignées dérivées de l'Hybride de Timor. C'est ainsi que nous avons sélectionné la variété 'Marsellesa' porteuse du gène  $C_k-1$  et résistante à la rouille. Dans les prochaines années, on peut penser que le nombre de marqueurs ne sera plus une limitation et qu'en conséquence on pourra développer un grand nombre de marqueurs pour tous les gènes de résistance à la rouille, au CBD comme aux nombreuses espèces de *Meloidogyne*. Il est d'ailleurs d'ores et déjà envisageable de pyramider un certain nombre de gènes de résistance au sein de lignées ou d'hybrides F1 (Figure 24).

## GROUPES HETEROTIQUES

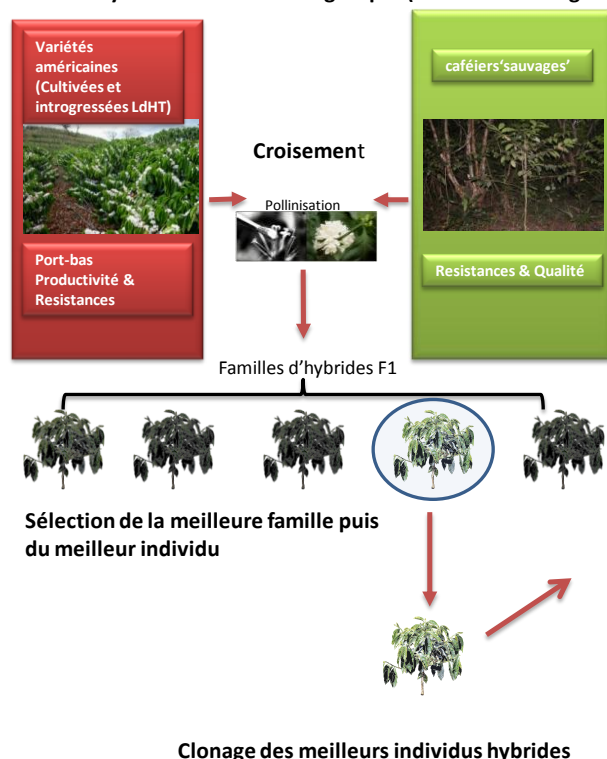
Pour que la voie hybride se justifie, il est nécessaire de trouver des pools génétiques complémentaires et bien identifiés. C'est la confrontation de génomes divergents et compatibles qui induit des interactions de dominance et d'épistasie (Lefort-Buson ; 1986).

Chez l'Arabica, il y a peu de choix de 'groupes' à confronter. D'une part la diversité génétique de l'espèce apparaît faible et peu structurée sur la base d'études moléculaire, d'autre part l'histoire de l'amélioration variétale est récente et s'est essentiellement portée sur une base génétique très faible. Le croisement entre lignées américaines dites traditionnelles amène une hétérosis négligeable, de l'ordre de 10% (Carvalho et Monaco, 1969) .

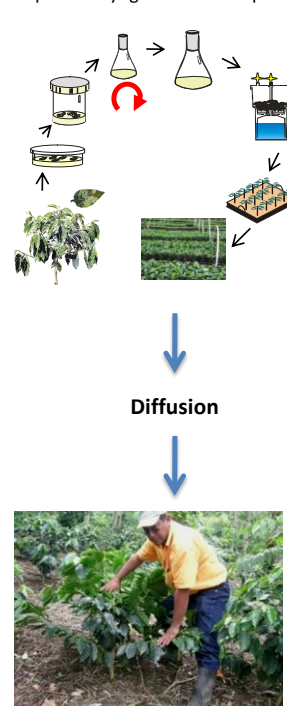
Pour mettre en évidence l'hétérosis, nous avons distingué deux groupes (Figure 11) :

- Le groupe des variétés américaines (traditionnelles issues de Bourbon ou introgressées dérivées de l'Hybride de Timor (LdHT). Toutes ces variétés sont de 'port-bas'.
- Le groupe des accessions sauvages d'Ethiopie ('sauvages')

### Sélection d'hybrides d'arabica intergroupes (cultivés x 'sauvages')



### Micropropagation par embryogenèse somatique



**Figure 11:** Schéma pour l'obtention et la multiplication de clones d'hybrides F1 d'Arabica mis en place par l'auteur et son équipe en Amérique Centrale et au Mexique.



Trois plans de croisement (3 x 13 ; 4 x 8 ; 6 x 11) ont été établis entre le groupe des cultivées et des LdHT comme parent femelle et le groupe des 'sauvages' comme parent mâle. Un diallèle (10 x10) a été créé entre les LdHT x LdHT.

A l'issue de nos travaux, (Bertrand *et al.*, 2005a et données non publiées) nous avons montré que les hybrides F1 issus des croisements entre les cultivées et les LdHT d'une part et le groupe des 'sauvages' d'autre part produisaient entre +22 et +47% de plus que les meilleures lignées parentales. En revanche, chez les hybrides intra-groupes issus du diallèle (LdHT x LdHT) l'hétérosis n'était pas significative et atteignait de -10% à +23% pour la production (cumul sur 5 ans).

## NATURE DE L'HETEROSIS

---

Dans l'étude Bertrand *et al.* 2005a, nous avons démontré que les hybrides produisent plus. Nous avons aussi étudié plusieurs paramètres végétatifs tels que le diamètre au collet, la hauteur, le nombre de primaires et leurs longueurs et le nombre de fruits par nœud. Nous avons montré que les hybrides produisent plus car ils mettent en place plus d'unités de croissance (nœuds et entre-nœuds) par unité de temps aussi bien sur les axes plagiotropes qu'orthotropes (Figure 12). Or chez le caféier, à chaque unité de croissance plagiotrope sont associés des bourgeons fructifères, dont le nombre est à peu près constant lorsque l'environnement n'est pas marginal. L'accroissement du nombre de nœuds fructifères apparaît finalement comme la caractéristique principale de la vigueur hybride.

Puisqu'un méristème peut connaître trois états (pause, mortalité, croissance), alors la probabilité de croissance des méristèmes chez l'hybride F1 est supérieure à celle des lignées parentales. C'est donc la capacité de réagir à l'environnement qui est supérieure chez les hybrides, les hybrides montrant une moindre sensibilité aux variations micro-environnementales. Cela est confirmé indirectement par l'estimation des variances résiduelles qui s'avèrent plus faibles chez la population d'hybrides que chez les lignées parentales pour une grande majorité des paramètres végétatifs mesurés.



Bertrand *et al.*, 2005 Euphytica

**Figure 12** les hybrides produisent plus car ils mettent en place plus rapidement plus d'unités de croissance (nœuds et entre-nœuds) par unité de temps aussi bien sur les axes plagiotropes qu'orthotropes comme on le voit sur la photo comparant un hybride F1 à son parent cultivé (ici le Caturra) pour des arbres de 3 ans cultivés dans les mêmes conditions agronomiques. Or chez le caféier, à chaque unité de croissance plagiotrope sont associés des bourgeons fructifères, dont le nombre est à peu près constant lorsque l'environnement n'est pas marginal. L'accroissement du nombre de nœuds fructifères apparaît en définitive comme la caractéristique principale de la vigueur hybride. Notez que la hauteur en fin de cycle de l'hybride n'est pas significativement supérieure à celle de son parent Caturra. Par contre, en fin de cycle l'hybride a mis en place plus de rameaux secondaires (sylleptiques et proleptiques) que son parent.

## HETEROZYGOTIE ET FERTILITE : UN INCONVENIENT DES HYBRIDES

La fertilité est l'aptitude d'un ovule à donner une graine. Comme la drupe porte deux graines, le rapport du nombre de graines au nombre de fruits, appelé coefficient de remplissage, définit la fertilité de l'arbre. Chez l'Arabica, en conditions environnementales favorables, les coefficients de remplissage varient entre 1.75 et 1.90.

Le coefficient de remplissage est lui-même défini par deux indices de stérilité : le taux de fruits à une écaïlle et une graine arrondie (appelé taux de 'caracolis') et le taux de fruit à une loge vide par rapport à deux loges vides.

La fertilité des hybrides F1 est toujours apparue significativement mais légèrement inférieure à celles des lignées (parentales ou non). La population d'hybrides F1 a montré une plus faible fertilité que celle des lignées. Les taux de loges vides et de caracolis étant significativement supérieurs à ceux des lignées (respectivement +1.2 à +6.3% et +2.2 à +3.9%), (Bertrand *et al.*, 2005a).

Ces résultats sont conformes aux observations des sélectionneurs expérimentés qui observent toujours une moindre fertilité en F1 avec un retour vers la normalité dès la F4-F5. Après 4 à 5 générations de sélection généalogique, les lignées dérivées de l'Hybride de Timor montrent en moyenne une fertilité comparable à celle des variétés traditionnelles, alors que le parent Hybride de Timor a une fertilité assez faible (Moreno, 1989).

Louarn (1992) a montré que les irrégularités de la méiose sont plus importantes dans les croisements inter-spécifiques que dans les croisements intra-spécifiques. Nous faisons l'hypothèse que la méiose de l'Arabica serait un peu moins bien régulée chez un hétérozygote que chez un homozygote.

L'avantage des hybrides pour le cumul rapide de gènes favorables des parents est évident lorsqu'il s'agit de gènes dominants (l'exemple le plus évident étant le gène de semi-nanisme 'Caturra').

Les principaux gènes de résistance à la rouille provenant de l'Hybride de Timor sont dominants. C'est également le cas du gène de résistance au *Colletotrichum kahawae* que nous avons contribué à découvrir (Gichuru *et al.*, 2008). En revanche pour les gènes de résistance aux nématodes la situation est plus complexe. Nous avons développé plusieurs études pour identifier des sources de résistance et nous avons estimé la résistance au niveau F1 dans des croisements du type R x S ou R x R.

### *Résistance aux nématodes des hybrides F1 d'Arabica (Figure 13)*

La résistance à *M. paranaensis* est gouvernée par au moins deux gènes de résistance complémentaires. Dans une étude menée avec Anzueto *et al.*, 2001, nous avons montré que les hybrides F1 exhibent une résistance partielle.

La résistance à *M. exigua* n'apparaît que chez certaines lignées dérivées de l'Hybride de Timor (Bertrand *et al.*, 2001a). La résistance est conférée par le gène majeur *Mex-1* qui provient de *C. canephora* que nous avons contribué à découvrir (Noir *et al.*, 2003) et qui est en cours d'analyse fonctionnelle dans notre laboratoire (Alpizar *et al.*, 2008; Alpizar *et al.*, 2006). Cependant, au niveau F1, nous avons montré, (Alpizar *et al.*, 2007), que les taux de multiplication du nématode était légèrement mais très significativement plus élevée que chez le parent résistant. Ce résultat nous a amené à considérer une résistance intermédiaire chez les hybrides F1.

Nous avons également montré que certaines accessions d'Ethiopie exhibent un bon niveau de résistance à une maladie à étiologie complexe 'la corchosis', causée par un champignon *Fusarium oxysporum* et un nématode *M. arabicida* que nous avons décrite (Bertrand *et al.*, 2000a). Après cinq années au champ en conditions de fortes infestations, nous avons montré que certains hybrides du type R x S montraient un très haut niveau de résistance à la 'corchosis' (Bertrand *et al.*, 2002).

Malgré l'existence de nombreuses sources de résistance à plusieurs espèces de nématodes chez l'Arabica que nous avons largement contribué à mettre en évidence, nous nous sommes orientés vers la sélection de porte-greffes interspécifiques multi-résistants aux nématodes. Ce choix a été dicté par plusieurs considérations d'ordre biologique et économique.

### ***Sur le plan biologique :***

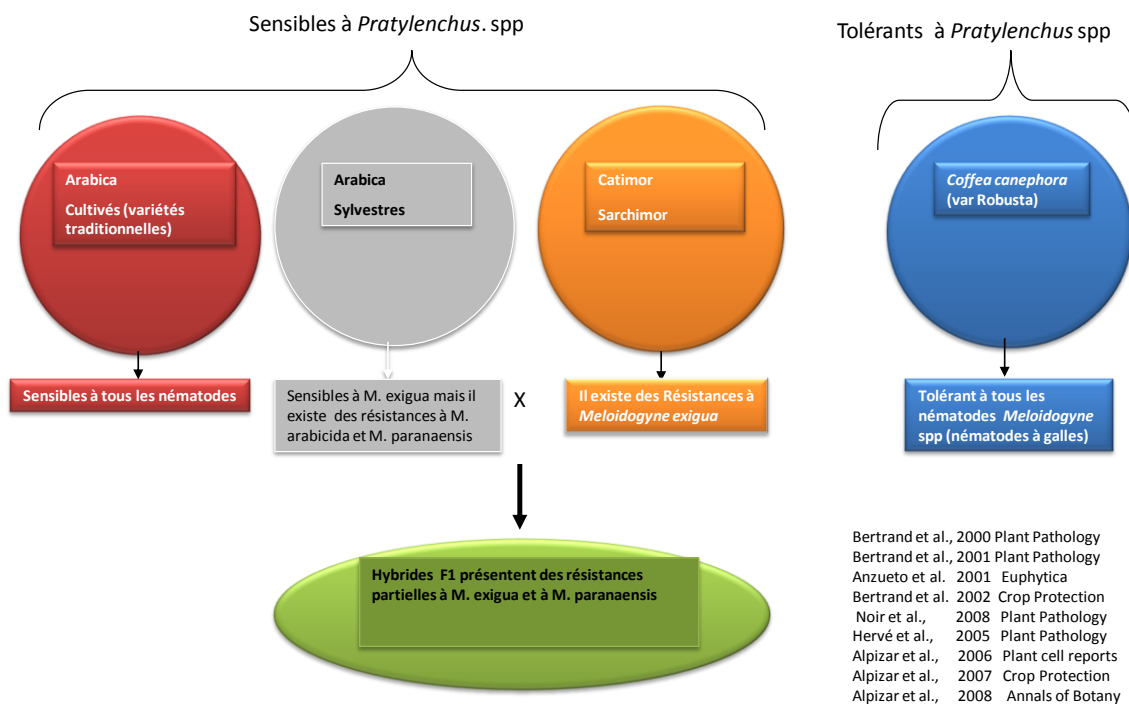
Plusieurs enquêtes et études ont montré qu'il existe de nombreuses espèces de nématodes à galles chez le caféier (Bertrand et Anthony ; 2008a). Ces nématodes se trouvent quelquefois en mélange dans un même sol et dans de très nombreux cas sont présents dans plusieurs régions caféières d'Amérique Latine. En conséquence il faut pouvoir distribuer des variétés multi-résistantes. Malheureusement le pyramidage de gènes de résistance est une opération longue et aléatoire chez l'Arabica. Chez le robusta en revanche il existe naturellement de nombreuses accessions multi-résistantes, (Gonçalves et Pereira, 1998 ; Anzueto, 1993).

### ***Sur le plan économique***

Le greffage interspécifique est une technique très bien maîtrisée à grande échelle en Amérique Centrale (Figure 14). Le coût supplémentaire est négligeable. Nous avons vérifié (Bertrand *et al.*, 2001b) que le greffage interspécifique ne modifiait pas la qualité de la boisson.

### ***Sélection d'une variété porte-greffe***

Nous avons sélectionné une variété porte-greffe (figure 15) qui est aujourd'hui diffusée majoritairement au Guatemala. Chaque année entre 3 à 6 millions de plantules d'Arabica sont ainsi greffées sur cette variété porte-greffe.



**Figure 13:** Situation des trois groupes de variétés (Arabica cultivés, Arabica sylvestres et Lignées dérivées de l'Hybride de Timor vis-à-vis de la résistance aux nématodes à galles (*Meloidogyne* spp) et au nématode provoquant des lésions (*Pratylenchus* spp). Nous avons constaté des résistances partielles à *M. exigua* et à *M. paranaensis* des hybrides F1. D'autre part tous les Arabica sont sensibles à *Pratylenchus* spp. De son côté *C. canephora* apparaît tolérant à *Pratylenchus* et multi-résistant aux *Meloidogyne*. Du fait de la facilité et de l'efficacité du greffage interspécifique sur robusta (cf figure 14) et du nombre élevé d'espèces de nématodes *Meloidogyne* auxquelles il faut faire face d'autre part, il apparaît que la sélection de porte-greffes Robusta est la voie à privilégier.



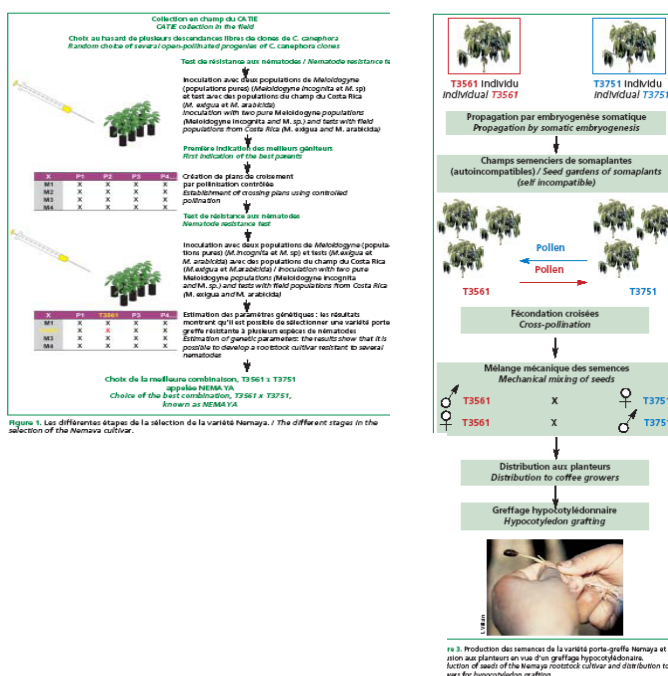
**Figure 14:** Technique de greffage hypocotylédonnaire. Au Amérique Centrale et au Brésil, en cas de fortes infestations de nématodes, on utilise un porte-greffe Robusta et un greffon arabica. Les qualités sensorielles et biochimiques du café produit par le greffon ne sont pas modifiées par l'espèce de porte-greffe (Bertrand et al., 2001). En zone chaude (inférieure à 900 m d'altitude dans les conditions d'Amérique Centrale, je recommande le greffage systématique (même en l'absence de nématodes pathogènes) car le porte-greffe confère une vigueur végétative qui se traduit par des hausses de rendement de plus de 20%-30% (données non publiées), *photos Luc Villain, CIRAD - UMR RPB.*



**Champ semencier biconal pour la production de semences de Nemaya au Salvador (Santa Ana)**

Les deux clones de Robusta sont autoincompatibles. La semence produite par les champs semenciers biconaux est issue des deux combinaisons. Plusieurs hectares de champs semenciers ont été créés au Guatemala et au Salvador. Chaque année plus de 6000 hectares de plantations nouvelles sont créées avec ce nouveau porte-greffe.

Bertrand et al., 2002 PRD  
Bertrand et al., 2001 Hort Science  
Bertrand et al., 2000 Euphytica



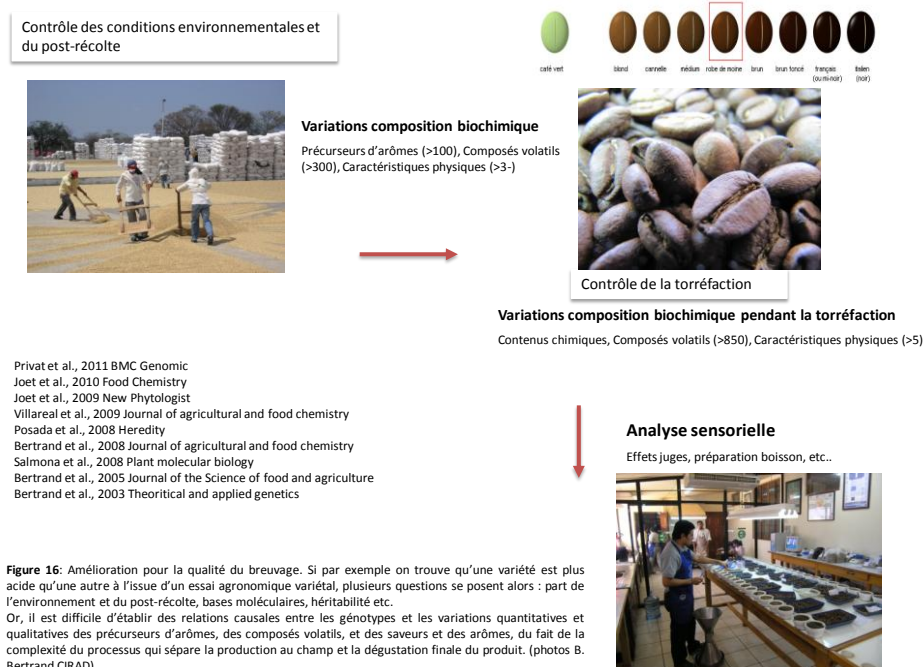
**Figure 15: principes d'obtention de la variété Nemaya (1991-2000).** Les semences de la variété Nemaya sont issues de champs semenciers biconaux. Les deux clones sont sélectionnés après une batterie de test de résistance vis-à-vis de 4 espèces de *Meloidogyne en conditions contrôlées et au champ et à Pratylenchus au champ* (ITirés de Bertrand B., Anzueto F., Moran M.X., Eskes A., Etienne H. 2002. Creation and distribution of a rootstock variety (*Coffea canephora*) by somatic embryogenesis. In : *Recherche et caféiculture*. Montpellier : CIRAD, p. 95-107. (Plantations, recherche, développement).



## QUALITE DU BREUVAGE DES HYBRIDES F1

### La sélection directe pour la qualité du breuvage

La sélection pour la qualité à la tasse est un domaine complexe et nouveau pour le café pour lequel aucune méthode satisfaisante n'a été trouvée. Les sources possibles de variation de l'appréciation de la qualité du breuvage d'un même échantillon de café sont très nombreuses (Figure 16). Pour n'en citer que quelques unes, le degré de torréfaction, la qualité de l'eau, la finesse de la mouture.etc.. Le café breuvage est aussi un produit complexe qui modifie rapidement ses propriétés sensorielles en fonction de température du breuvage.



D'autre part, entre deux échantillons de café provenant d'un même clone, produit au même endroit, les sources de variation peuvent provenir de la préparation de l'échantillon (temps de fermentation ; de séchage, ..etc..), de la qualité du stockage, de la période de récolte, de l'année de production, de l'état physiologique de la plante. Toutes ces sources de variation doivent être maîtrisées pour percevoir les différences dues à l'environnement ou au génotype.

Par ailleurs, les juges doivent être spécifiquement formés à la description des échantillons provenant de génotypes variés pour donner des réponses répétables et discriminantes. Or la plupart des juges sont accoutumés à juger des défauts de boisson. Peu de juges savent discriminer des cafés suivant leurs origines. Très peu sont capables de discriminer des cafés suivant leur background génétique (communication personnelle).

La discrimination de génotypes pour la qualité est un sujet complexe que nous avons essayé d'aborder de multiples façons, soit en contribuant à des études sur les précurseurs d'arômes et les composés volatils, soit sur la base d'essais de dégustation variétaux avec des jurys confirmés et bien entraînés. Récemment nous avons résumé ces travaux dans un chapitre de livre sous presse (Montagnon, Marraccini, Bertrand ; 2011)

Dans les dernières années des variétés dérivées de l'Hybride de Timor comme CR95 ou T5175 ont été diffusées massivement. Devant la pression des torréfacteurs qui trouvaient que ces variétés présentaient un niveau de qualité insuffisant, les instituts du café ont dû cesser la diffusion de ces cultivars. A la suite de ce premier constat j'ai développé une étude qui montre qu'effectivement les lignées introgressées dérivées de l'Hybride de Timor peuvent présenter des goûts médicinaux hérités de leur parent *Canephora* (Bertrand *et al.*, 2003).

Sur la base de plusieurs années de tests sensoriels, j'aboutis provisoirement à un système de classement en grandes catégories par rapport à un 'standard' (travail non publié). La variété 'standard' en Amérique Centrale Mexique et Colombie est la variété 'Caturra', qui est issue de 'Bourbon'.

J'ai constaté que pour progresser dans la sélection pour la qualité à la tasse, nous devons maintenant nous concentrer sur trois critères sensoriels. D'une part l'acidité de la boisson, d'autre part, les goûts 'fruités' et enfin, les goûts 'médicinaux'.

Les goûts 'médicinaux' sont toujours détectables et sont peu influencés par l'environnement. Il devrait être relativement facile de déterminer les bases moléculaires et peut-être génétiques de ces goûts indésirables.

Les goûts 'fruités', sont très dépendants de l'environnement. On ne les détecte sans équivoque qu'à certaines altitudes (i.e. températures). L'interaction GxE est donc très marquée pour cette cible.

L'acidité est un critère qui varie avec l'environnement et avec les génotypes. Cependant il semble y avoir peu d'interactions G x E.

Les sept catégories sont

- a) cafés 'médicinaux et/ou amers' (type Catimor T18123 ou T5175)
- b) acides à goût de céréales (type Lignées Srachimor IAPAR 59 ou Catimor CR95)
- c) Plat (Ethiopien 59, Laurina)
- d) Standard (type Caturra, Bourbon, Mundo Novo, Catuai)
- e) Acides (Marsellesa)
- f) Fruité (H3, Ethiopien ET26)
- g) Fruité et acide (Centroamérica)

Sur la base de nos travaux nous avons constaté que dans la catégorie des cafés 'médicinaux' ou 'acides à goût de céréales' on ne trouve que des lignées introgressées. Dans les catégories 'plat', 'standard', 'acides' on trouve tous les types de génotypes, introgressés, mutants, 'sauvages'. Il est important de noter que les catégories 'fruité' et 'fruité-acide' sont température-dépendant. En dessous de 900-1100 m d'altitude, aucun génotype n'entre dans ces deux catégories. Le caractère fruité ne s'exprime que dans les environnements les plus frais (de 1100 à 1400 m dans les conditions d'Amérique Centrale). On ne trouve aucune variété cultivée issue de Bourbon et aucune variété introgressée dans les catégories 'fruité' et 'fruité et acide'.

Avec ces trois critères, il est possible de :

- a) Eviter de sélectionner des variétés avec des goûts médicinaux
- b) Sélectionner des variétés plus acides (ou moins acides)
- c) Sélectionner des variétés avec des goûts fruités (mais dans ce cas il faut déployer les génotypes en haute altitude)

Concernant les hybrides, on les trouve dans toutes les catégories en fonction de leurs parents d'origine. Lorsque deux parents ont une qualité standard, les hybrides sont 'plat' ou 'standard'. Lorsque l'un des parents est acide et le parent standard, l'hybride peut-être standard, acide ou plat. Si l'un des parents est dans la catégorie 'médicinal' et l'autre dans la catégorie 'standard' l'hybride est au mieux dans la catégorie 'standard'.

Pour produire un clone d'hybride 'acide & fruité', il faut un parent dans la catégorie 'acide' et l'autre dans la catégorie 'acide et fruité' ou 'fruité'.

Parmi les 21 clones d'hybrides que nous avons testés à grande échelle (dans un réseau multinational en Amérique Centrale regroupant plus de 120 parcelles), en définitive seuls quatre clones sont dans la catégorie 'fruité' ou 'acide & fruité'. Parmi ces trois clones, le clone H1 (variété baptisée 'Centroamérica') a été diffusé à plus de 2 millions de plantes (fin 2010). Le profil sensoriel de ce clone est reconnu exceptionnel et en rupture avec le 'standard' Nicaraguayen par les acheteurs de café fin (Nespresso, Starbucks, etc..) ce qui amène à considérer des stratégies commerciales fondées sur la différenciation génotypique pour les plantations faites à plus de 1100 m au-dessus du niveau de la mer.

L'ensemble des travaux que nous avons mené sur la sélection directe est partiellement publié. Le système de classification empirique que nous avons développé fonde une nouvelle approche simplificatrice qui devrait être très utile pour le sélectionneur. Toutefois, même simplifiée cette approche est coûteuse à appliquer sur de grands effectifs. Il est donc nécessaire de développer des systèmes de sélection indirecte.

#### *Sélection indirecte pour la qualité du breuvage*

##### a) Sur les précurseurs d'arômes :

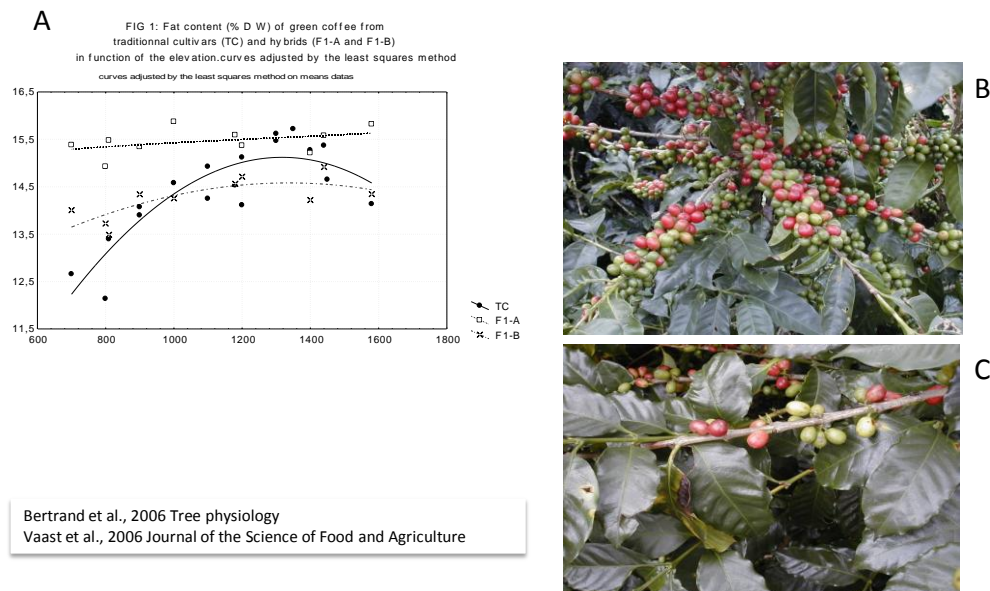
Nous avons étudié la composition du fruit au cours de son développement (Salmona *et al.* ; 2008, Joel *et al.*, 2009 et 2010; Privat *et al.*, 2011). Ces études ont permis de comprendre comment se mettent en place les réserves de la graine qui sont les précurseurs d'arômes lors de la torréfaction.

En ce qui concerne ces précurseurs d'arômes, pour l'instant seul la teneur en lipides semble être un indicateur indirect de la qualité du breuvage. En effet, nous avons étudié les variations de la composition en acides gras, en acides chlorogéniques, en éléments minéraux (Villareal *et al.* , 2009 et Bertrand *et al.*, 2008b) en fonction des génotypes et de l'environnement. Les variations de ces éléments sont trop faibles pour pouvoir expliquer les variations de la qualité du breuvage constatées.

En ce qui concerne la teneur en lipides, il nous semble par contre avoir mis le doigt sur un mécanisme intéressant. Si l'on discrimine des échantillons de café sur l'acidité et la préférence, on constate que pour les échantillons les plus acides (qui sont également ceux qui sont préférés par les juges), la teneur en lipides totaux (exprimée en % de la matière sèche) est très significativement supérieure à celle des échantillons les moins appréciés. Par ailleurs nous avons montré (Bertrand *et al.*, 2006a) que la teneur en lipides des hybrides est supérieure à celle des lignées parentales les plus productives. Nous avons également démontré que des baisses du ratio feuilles/fruits entraînent une plus faible acidité du breuvage (Vaast *et al.*; 2006 ). La teneur en lipides de la semence (de l'endosperme) est un indicateur indirect de l'état physiologique dans lequel se trouvait la plante lors du développement des fruits. Lorsque la teneur en lipides est élevée cela signifie que le remplissage du grain s'est fait dans les meilleures conditions de croissance possible, donc avec un ratio feuilles/fruits favorables.

Selon nous la meilleure performance des hybrides pour la teneur en lipides est liée à leur meilleur ratio feuilles/fruits. Ce meilleur ratio feuilles/fruits (Figure 17), qui est dû au plus grand nombre d'unités de croissance mises en place par unité de temps, est vrai tout au long du cycle de production. La sélection indirecte sur la teneur en lipides appliquée sur deux ou trois productions apparaît ainsi comme un bon indicateur de la vigueur de la plante et de sa capacité à faire face aux stress. Une teneur en lipides du grain élevée et stable est la garantie d'une qualité plus stable et d'un café plus acide. En aucun cas, cependant la teneur en lipides n'est la cause de l'acidité.





**Figure 17:** Homéostasie des hybrides pour la qualité à la tasse. A) On constate que la teneur en lipides des hybrides est plus élevée que celle des variétés lignées (Bertrand et al 2006). B) & C), On met en évidence que la charge en fruits et notamment le ratio feuilles/fruits influent sur la qualité à la tasse (Vaast et al., 2006). Pour bien nourrir le fruit, il faut une surface de feuilles minimale. Les hybrides ont un meilleur ratio feuilles/fruits que les variétés parentales. Par des essais répétés (données non publiées) on montre que les variances interannuelles ou inter localités calculées sur l'acidité et la préférence sont plus faibles chez les hybrides que chez les lignées parentales. En conséquence, les hybrides ont une qualité du breuvage plus stables que celles de leur parent le plus productif (i.e., la variété lignée parentale cultivée).

#### b) Sur les composés volatils

Nous avons entrepris d'étudier la variation de la composition en composés volatils (technique SPME GC MS) du café vert en faisant varier l'altitude et les génotypes (études en cours). Les résultats sont très prometteurs et nous pensons qu'il sera possible de détecter des composés volatils liés au goût 'fruité' ou lié aux goûts 'médicinaux'.

#### c) Sur la signature en spectroscopie proche infrarouge

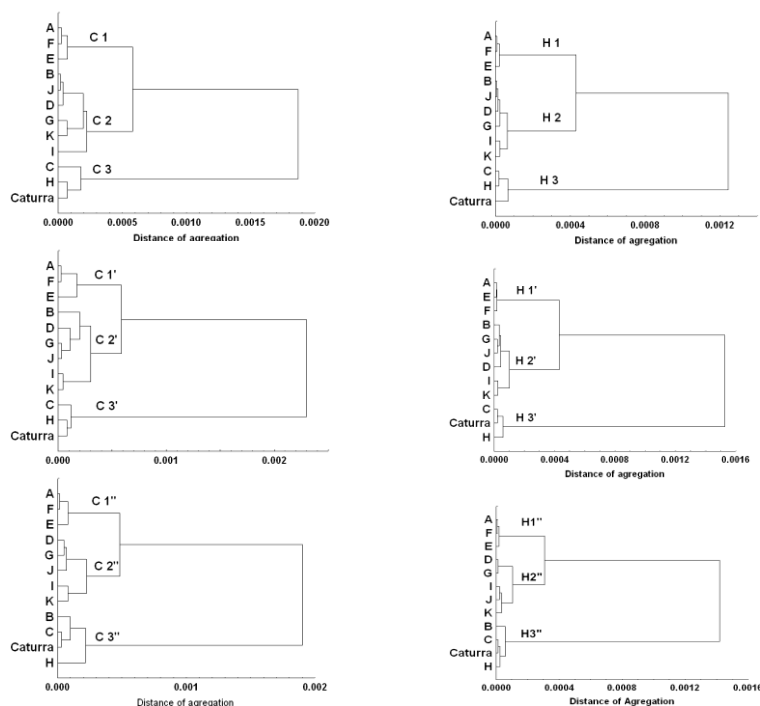
La spectroscopie proche infrarouge (NIRS) est souvent utilisée par les sélectionneurs, car il s'agit d'une méthode d'analyse rapide et massive qui permet de doser les composants majeurs sur des échantillons broyés ou non. C'est ainsi que nous avons contribué à développer des équations basées sur les spectres infrarouges pour la détermination de la composition en acides gras du café vert (données non publiées).

Les spectromètres infrarouges permettent l'acquisition de spectres comportant plusieurs milliers de points de mesure. Il s'agit d'une information très riche qui constitue une véritable signature de l'échantillon analysée.

Dans une première étude, à partir d'une collection spectrale obtenue sur plusieurs centaines de génotypes, nous avons montré à partir d'échantillons de café vert broyés qu'il était possible de distinguer les lignées introgressées (dérivées de l'Hybride de Timor) des lignées non introgressées avec une grande précision (Bertrand et al., 2005b).

En utilisant ce résultat, nous avons ensuite montré qu'il était possible d'utiliser la signature spectrale pour regrouper des génotypes qui avaient été déployés dans trois environnements contrastés. Nous avons émis l'hypothèse que la signature spectrale contient deux types d'informations, l'une liée à l'environnement et l'autre au génotype, et que l'information liée au génotype peut être mise à profit pour structurer une diversité basée sur les composants majeurs du grain A tous les points du spectre nous avons calculé l'héritabilité au sens

large. Seuls les points à forte héritabilité ont été conservés. En utilisant cette information, nous avons alors montré que les regroupements entre variétés étaient stables d'un environnement et d'une année sur l'autre (Posada *et al.*, 2009) Figure 18.

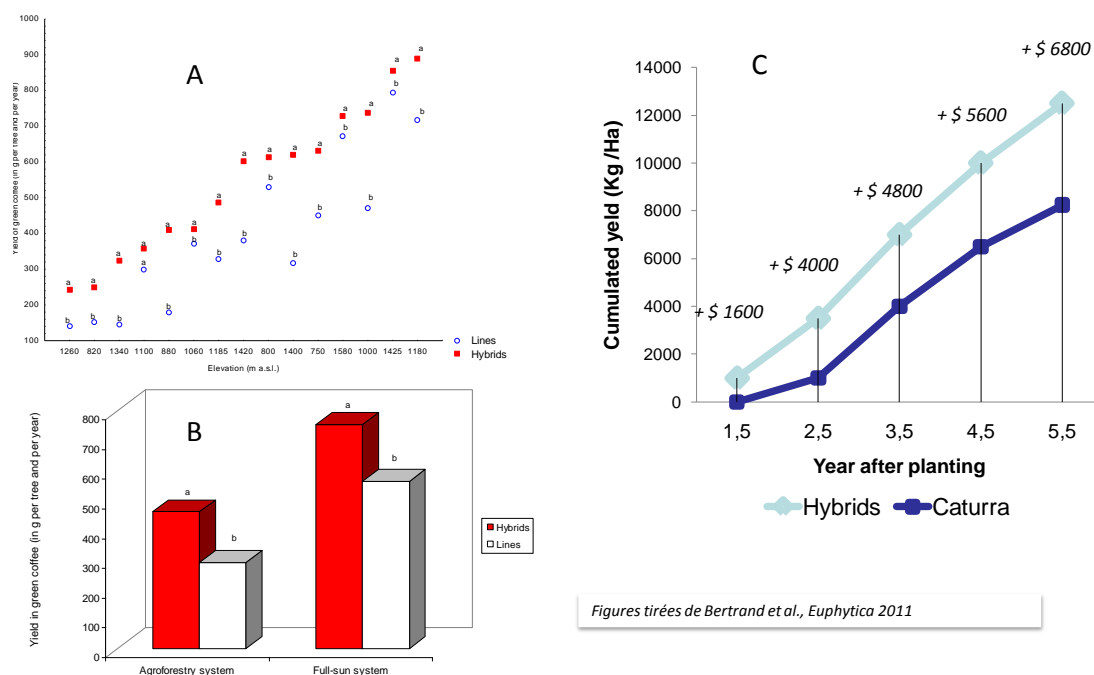


**Figure 18:** Hierarchical clustering analysis (square Euclidean distance, Ward grouping method) performed on NIR spectra acquired on ground green coffee. Graphs 1, 2, 3 representing locations 1, 2 and 3 respectively were obtained from the whole spectra of 12 varieties. Graphs 4, 5 and 6 representing locations 1, 2 and 3 respectively were obtained from the heritable zones of the whole spectra of the 12 varieties. For each graph, distance-based clustering enabled the definition of three main groups (that is, C1, C2, and C3 for graph 1) of varieties sharing a similar NIR signature, and (that is, H1, H2, and H3 for graph 4) of varieties sharing similar NIR heritable zones in their signature. Tiré de Posada *et al. Heredity*, 2008. La stabilité de la signature NIRS du café vert permet au sélectionneur d'utiliser cette information peu coûteuse, pour classer et discriminer les lignées parentales introgressées et confronter ces groupes aux groupes sensoriels (travail en cours). Le sélectionneur recherche des signatures le plus proche possible des standards traditionnels non introgressés. Par exemple, les variétés introgressées C et H ont probablement une composition du grain proche de celle de 'Caturra' qui est la variété standard. Les variétés A, E et F paraissent être distantes du standard 'Caturra'.

A partir de cette constatation nous sommes en train de tester l'hypothèse qu'il est envisageable de discriminer les catégories sensorielles décrites plus haut à partir des signatures spectrales. A partir de plus de 900 échantillons, nous montrons que nous pouvons classer correctement 97% des échantillons dans leurs catégories respectives. Cette étude doit être poursuivie. Si ce résultat est confirmé, cela débouchera sur une méthode de sélection indirecte rapide et préliminaire applicable à de grandes populations pour des études génétiques et pour une sélection assistée par NIRS.

## HETEROSIS ET HOMEOSTASIE EN MILIEUX PAYSANS

Au cours d'une étude lourde financée par la Banque Interaméricaine de Développement, nous avons testé les hybrides en conditions paysannes et sous différents systèmes de production (Bertrand *et al.*, 2011). Par rapport aux variétés traditionnelles, les hybrides se sont révélés extrêmement performants chez les petits producteurs sans fertilisation additionnelle (Figure 19). Les différences de rendement par rapport aux variétés traditionnelles atteignent + 58 % dans les systèmes agroforestiers et +34% en systèmes plein-soleil. Nous montrons également que les hybrides présentent plus de stabilité de production d'une année sur l'autre que les variétés traditionnelles.



Figures tirées de Bertrand et al., Euphytica 2011

**Figure 19 :** A) Comparison of the mean yield of lines and of hybrids in the 15 trials; (X axis: elevations in m a.s.l., Y axis = Yield in green coffee). Two different letters indicate significant differences at  $P < 0.05$  between hybrids and lines in the same trial (i.e. elevation).

B) Comparison of the mean yield of lines and of hybrids according to the cropping system. Two different letters indicate significant differences at  $P < 0.05$  between cropping systems.

C) Economical comparison of Hybrids and Caturra (pure line). Study of INCAE and ECOM group in Nicaragua. The financial gain > 6000 USD /ha when using Hybrids after 5 years.

Les hybrides sont toujours supérieurs aux lignées quelle que soit l'altitude et quel que soit le système de culture.

## AUTRES ARGUMENTS EN FAVEUR DES HYBRIDES F1

Les hybrides sont multipliés par clonage des meilleurs individus. Dans le contexte de la caféiculture Américaine, l'homogénéité et la reproductibilité des clones d'hybrides F1 est un argument en faveur de la voie hybride. Par rapport aux variétés traditionnelles souvent multipliées para auto-approvisionnement des producteurs, les clones d'hybrides sont parfaitement reproductibles ce qui n'est pas le cas des lignées plus ou moins homozygotes. Enfin, les hybrides F1 accroissent considérablement la diversité génétique du verger car ils sont issue d'une base génétique large et non exploitée en Amérique Latine.

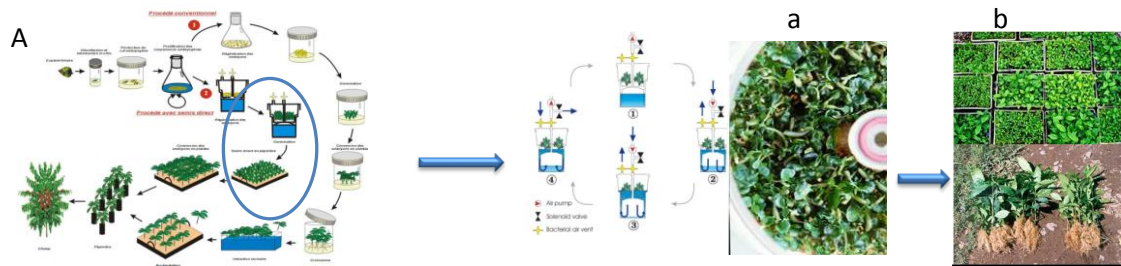
## LA PRODUCTION DE SEMENCES HYBRIDES

Le succès d'une dissémination à large échelle des variétés hybrides dépend du contrôle du système de reproduction et des coûts de production des semences. Les variétés hybrides ne peuvent se justifier que si le surcoût des semences est inférieur au gain dû au rendement supérieur. J'ai développé une technique basée sur une stérilité mâle génique récessive. Pour des raisons de confidentialité liée à un partenariat public-privé et à une demande de brevet en cours j'en parlerai peu ici (Figure 20). J'ai également contribué à développer la technique d'embryogenèse somatique qui permet une multiplication clonale des meilleurs individus F1.

Au travers de plusieurs études j'ai contribué au développement de cette technique et à son transfert au niveau industriel. Ces travaux et le transfert industriel qui s'en est suivi sont résumés dans les figures 21, 22 et 23.



**Figure 20:** Principe des champs semenciers utilisant la stérilité mâle pour production d'hybrides F1 sous forme de semences. Ces champs semenciers sont installés dans des parcelles forestières pour assurer un isolement pollinique maximal. Le concept est actuellement à l'étude. Une première récolte de quelques graines par arbre a été obtenue en 2010. On attend une première 'vraie' récolte importante en 2011 pour valider définitivement le concept 'inventé' par l'auteur (demande de brevet à l'étude).



Phase étudiée: mise au point des conditions de prégermination

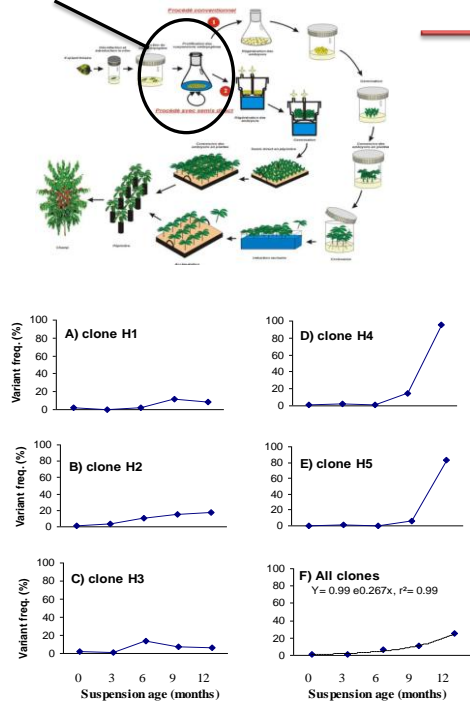
Les temps d'immersion, les densités de culture, la teneur en sucres et la taille de l'embryon jouent un rôle prépondérant sur la germination. Le semis direct d'embryons pré-germés (a) sur substrat horticole (b) constitue une innovation considérable car cela réduit les coûts de production par 3.

- Menedez-Yuffa *et al.* 2010. Plant Cell Tissue Organ Culture  
 Albarrán *et al.* 2005. Plant Cell Tissue Organ Culture  
 Barry *et al.* 2005 Plant Cell Report  
 Barry *et al.* 2002 Plant Cell Tissue Organ Culture  
 Barry *et al.* 2002 Annals of Botany  
 Etienne *et al.* 1999 Plant Cell Reports



**Figure 21:** A) La mise au point de bonnes conditions de prégermination en bioréacteur permet d'envisager un semis direct sur substrat horticole d'embryons prégermés. B) Mise au point d'un nouveau Bioréacteur qui vient prendre la place du bioréacteur RITA (à droite) jugé trop petit et mal conçu pour la prégermination. Le nouveau Bioréacteur appelé Matis® (à gauche sur la photo) a fait l'objet d'un dépôt de brevet par l'auteur et deux de ses collègues.

Phase étudiée

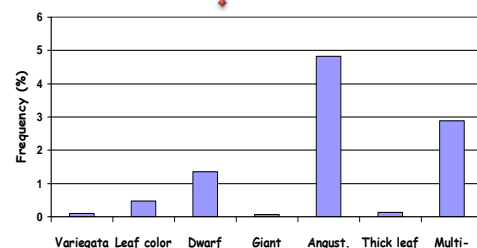


7 types de variants phénotypiques découverts

Type 'angustifolia'



Type 'variegata'



Fréquence des variants après suspension en milieu liquide pendant 1 année. 70% des variants sont détectés en pépinière.

On observe une forte augmentation des variants après 6 mois en suspension  
 Certains génotypes sont plus affectés par les variations somaclonales

Etienne & Bertrand 2001 Tree physiology  
 Etienne et Bertrand 2003 Tree physiology

**Figure 22:** Mise en évidence des fréquences et des types de variations somaclonales produites par l'embryogenèse somatique lors de la phase dite de 'suspensions cellulaires'. La faible fréquence constatée (<5% avec 6 mois de suspension) a permis de poursuivre le transfert de la technique en conditions industrielles et permet d'envisager pour la première fois une diffusion massive des clones d'hybrides.





**Figure 23:** Le transfert réussi de la technologie mise au point par l'équipe au Nicaragua et au Mexique. L'activité commerciale de vente de plants a débuté depuis 2009 avec la vente de plus d'un million de vitroplants (2 M en 2011). La capacité des deux laboratoires est de 10 Millions de plantes/an. L'activité génère plus de 50 emplois. L'expérience est photocopiable dans de nombreux pays. *Tiré de Etienne et al., 2011. Photos Etienne, Georget et Bertrand CIRAD*

Le coût additionnel d'un vitroplant par rapport à un plant issu de graine (lignée fixée) est de 0.5 à 0.6 USD. Cela représente un investissement additionnel de 2500 à 3000 USD/ha. Une récente étude de l'INCAE (Business school) a montré que la rénovation du verger avec des plantes hybrides engendrait une différence positive de plus de 6000 USD/ha au bout de 6 ans en faveur des hybrides. Le remboursement de l'investissement additionnel intervient dès la deuxième récolte (Figure 19).

## COMMENT POURSUIVRE LA CREATION D'HYBRIDES F1

Grâce à mes travaux et à ceux de mes collègues de mon équipe, la preuve est faite que les variétés hybrides F1 sont supérieures aux variétés lignées et qu'il est possible de diffuser massivement les structures hétérozygotes à un coût acceptable par les producteurs, sous forme de semences ou sous forme clonale.

Les hybrides actuellement diffusés ont été créés pour le contexte de l'agroforesterie en Amérique Centrale. Il est vraisemblable que ce matériel sera très bien adapté aux conditions d'Amérique Andine. Pour le reste du monde (Brésil, Afrique, Asie) il faudra tester des hybrides adaptés aux contraintes spécifiques de ces régions. D'autre part, il faut se préparer aux changements climatiques ce qui implique de sélectionner du matériel plus rustique, mieux adapté à des périodes de fortes températures, de sécheresse, d'excès d'eau, etc..

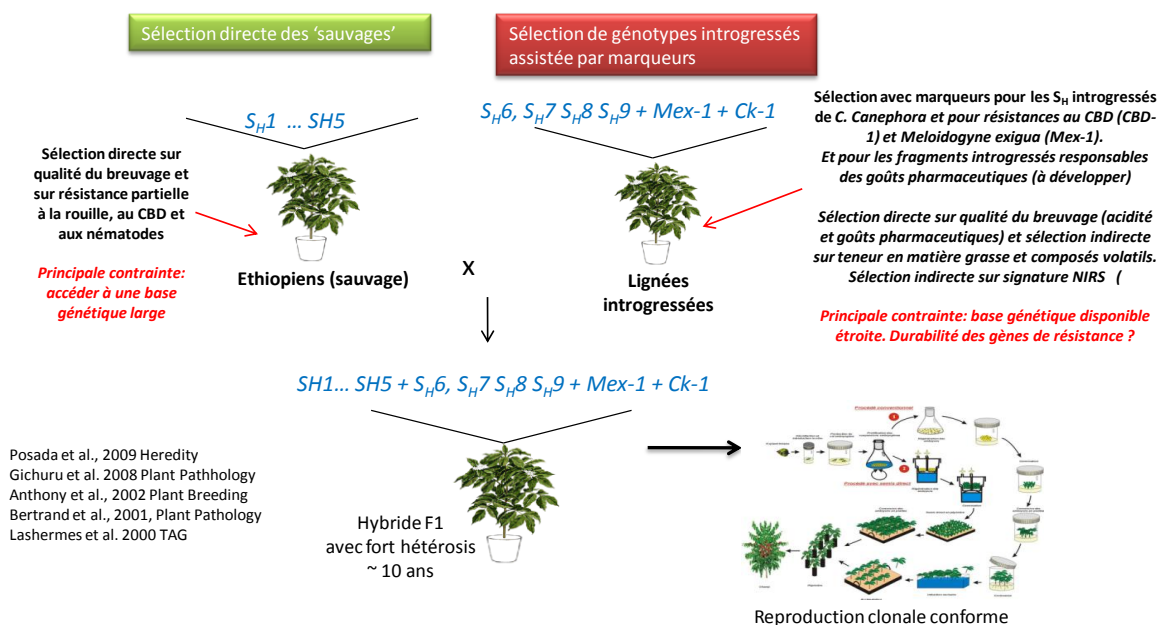
## A COURT TERME

A court terme, nous proposons de poursuivre la création variétale d'hybrides F1 en se basant sur les mêmes principes que ceux définis précédemment mais en insistant sur le pyramidage de gènes de résistance à la rouille et au CBD. Un pyramidage raisonné est rendu possible par l'utilisation de marqueurs moléculaires liés

aux gènes de résistance. Il reste encore à développer de nombreux marqueurs liés aux gènes de résistance à la rouille. Des équipes de Colombie, du Brésil et notre équipe y travaillent (Figure 24).

Près d'une centaine de lignées d'introgression de *C. arabica* sont actuellement disponibles pour les croisements. La majorité ont été analysées à l'aide de marqueurs AFLP (ces études sont poursuivies avec des marqueurs SSR). Bien que variable selon les lignées, on observe généralement un nombre important de marqueurs introgressés provenant de *C. canephora* au sein de ces lignées (Bertrand *et al.*, 2001a; Lashermes *et al.*, 2000). L'analyse de la distribution de ces marqueurs parmi les lignées montre des événements de recombinaisons génétiques au sein des fragments chromosomiques introgressés. La distribution génomique et le devenir de ces fragments au cours des générations de rétrocroisements ainsi que leur impact sur la qualité du café produit par les génotypes arabica introgressés peuvent être négatifs (Bertrand *et al.*, 2003) et en conséquence il faut veiller à éviter les goûts pharmaceutiques et trouver des marqueurs liés à ces goûts indésirables (Figure 24).

**Programmes d'amélioration à court terme : développer des hybrides F1 (hétérosis et réduction du temps) ayant une résistance durable à la rouille (par pyramidage de facteurs de résistance) et une bonne qualité du breuvage**



**Figure 24:** Perspectives à court et moyen terme de la création variétale d'hybrides F1 d'Arabica présentant des résistances durables et une bonne qualité à la tasse. Le fort hétérosis entre les deux groupes permet d'espérer des gains de productivité élevés. Le développement récent de plusieurs centaines de marqueurs moléculaires de l'introgression permet d'envisager une sélection assistée par marqueurs chez les introgressés. Il faut une dizaine d'années pour développer de nouveaux clones.

## A MOYEN ET LONG TERME

Cependant, la création d'hybrides F1 est une action 'opportuniste' dans le sens qu'elle s'appuie sur une sélection généalogique pour l'obtention de variétés lignées parentales dérivées de l'Hybride de Timor, qui a nécessité plus de 40 années de travail. Or face à la menace du contournement des gènes de résistance il faut d'une part poursuivre les efforts d'identification de nouvelles sources de résistance et d'autre part introgresser ces sources de résistance au sein de l'Arabica. Il faut renouveler les lignées parentales introgressées. C'est sans doute là le défi majeur à relever pour les programmes d'amélioration au niveau mondial.

D'autre part la base génétique des Arabica 'sauvages' disponible hors Ethiopie est limitée. Jusqu'à présent l'Ethiopie s'est montrée très peu désireuse d'échanger ses ressources génétiques. A moyen et long terme, pour continuer de la création variétale adaptée aux nouveaux défis, il faut proposer un schéma global d'amélioration de l'Arabica pour la voie F1.

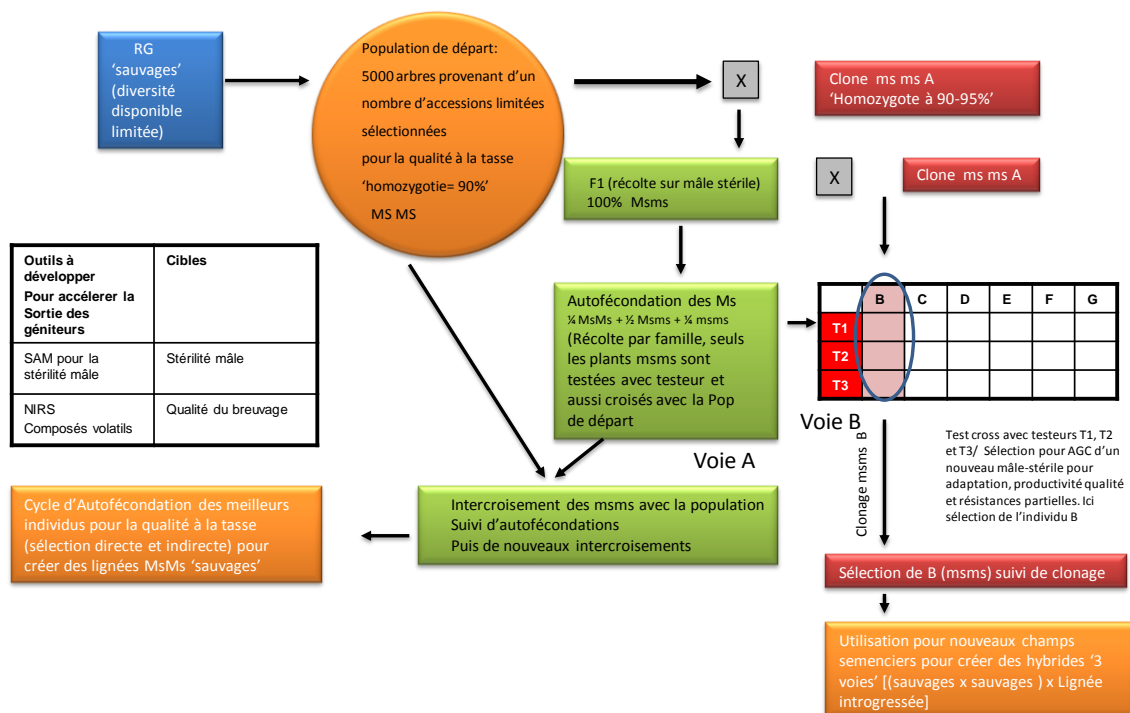
#### MAINTENIR LES GROUPES HETEROTIQUES

La complémentarité des origines génétiques est à la base du développement des variétés hybrides. Compte tenu de la nature encore mystérieuse (et sans doute fragile) de l'hétérosis chez l'Arabica, il faut préserver la nature 'sauvage' du groupe des Ethiopiens et donc éviter dans la mesure du possible une 'contamination' par des croisements avec le groupe des variétés cultivées. Nous proposons d'une part d'éclater la diversité génétique du groupe des 'sauvages' par allogamisation et d'autre part, d'introgresser des caractères d'intérêt agronomique et notamment des résistances aux maladies à partir d'hybridations interspécifiques.

#### BRASSAGE DU GROUPE DES 'SAUVAGES' PAR ALLOGAMISATION

A partir de la base génétique réduite à laquelle les programmes d'Amérique Latine ont accès et devant les difficultés à enrichir cette base génétique (blocages des échanges par l'Ethiopie), il semble nécessaire de provoquer un maximum de recombinaisons entre allèles. Il est possible de proposer un brassage de la population réduite de départ par 'allogamisation' grâce à l'utilisation d'une stérilité mâle génique récessive telle que celle que nous utilisons pour la production de semences . Un exemple de ce qui pourrait être mis en place pour l'Arabica est proposé dans la figure 25.





**Figure 25:** Allogamisation des 'sauvages'. L'accès aux Ressources génétiques est limité. Pour améliorer le groupe des 'sauvages' en Amérique Latine, on propose une 'allogamisation' du groupe des 'Sylvestres' par utilisation de la stérilité mâle génique récessive trouvée par l'auteur. Dans la voie A, on fait des cycles de brassage consistant en croisements entre la population à brasser et les mâles-stériles suivi d'autofécondations, suivi de nouveaux intercroisements. Après deux intercroisements on recommence. Après deux cycles d'autofécondation on peut aussi choisir les meilleurs individus pour revenir à des lignées fertiles 'sauvages'.

Dans la voie B, il s'agit de tester les plantes mâles-stériles les plus performantes pour produire des hybrides '3 voies' avec la stratégie des champs semenciers décrite dans la figure 20. Pour tester l'AGC de ces géniteurs 'ms' on utilise des testeurs (T1, T2 et T3) issus des lignées introgressées.

Le développement massif de marqueurs polymorphes chez *Arabica* est difficile du fait de la nature tétraploïde de l'espèce mais aussi du fait de la très faible diversité génétique disponible. Il n'est donc pas envisageable pour le moment de développer une SAM sur des caractères liés à la qualité et même aux résistances. En revanche, l'importance du caractère mâle-stérile en fait une cible prioritaire, pour laquelle la découverte de marqueurs liés serait un avantage considérable.

#### DIVERSIFIER LES SOURCES DE RESISTANCES AUX STRESS BIOTIQUES ET ABIOTIQUES PAR L'INTROGRESSION DE GENES (I.E., FRAGMENTS CHROMOSOMIQUES) PROVENANT DU GENRE COFFEA

Il s'agit là d'un programme de longue durée (Figure 26) dont l'objectif est de créer d'une part des variétés porte-greffes vigoureux et résistants aux maladies telluriques et d'autre part des lignées introgressées. L'objectif est de dissocier la sélection pour la partie racinaire de celle pour la partie aérienne. Dans les deux cas, il s'agit d'accumuler dans un même génotype (ou groupe de génotypes) le plus grand nombre de gènes favorables (notamment les gènes de résistances) sans que cela ne diminue la qualité du breuvage des lignées parentales.

Dans les dernières années, plusieurs lignées introgressées dérivées de l'Hybride de Timor ont perdu la résistance à la rouille du fait de l'apparition de nouvelles races virulentes (Varzea et Marques, 2005). L'introgession de nouvelles sources de résistance apparaît donc comme une priorité à moyen et long terme.

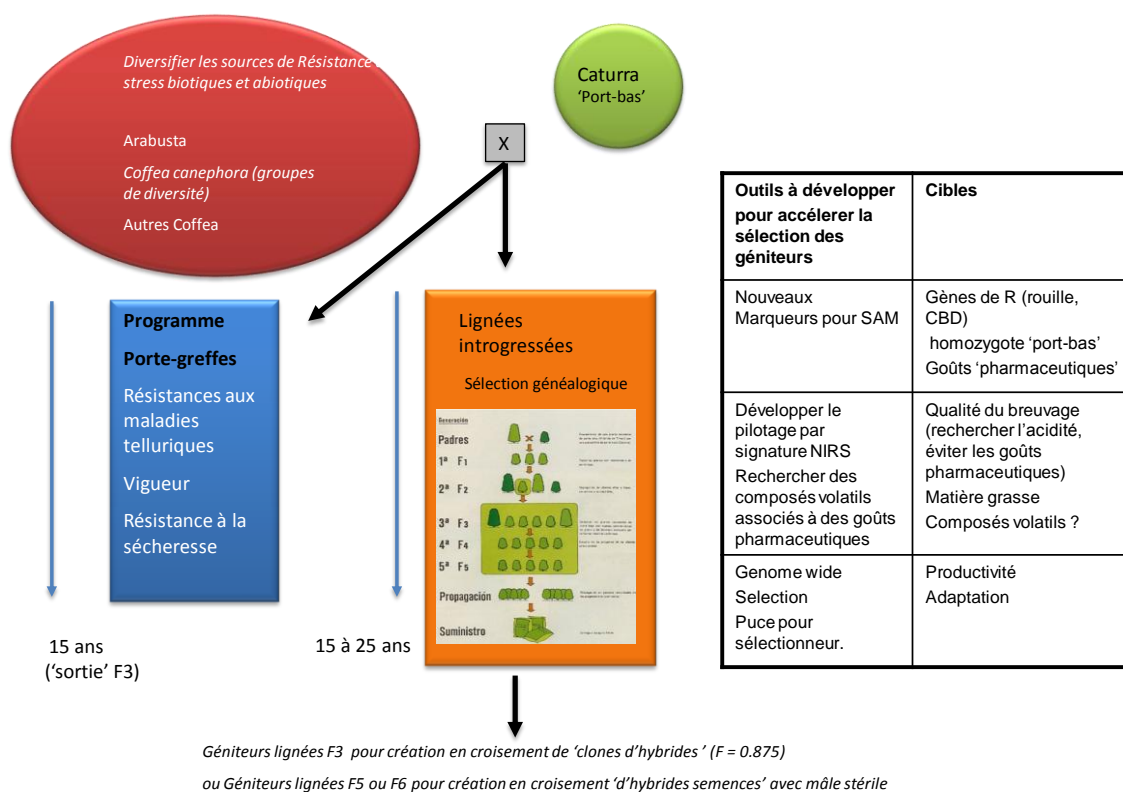
Le croisement et l'obtention d'hybrides interspécifiques entre l'espèce tétraploïde *C. arabica* ne constituent pas un obstacle au transfert de gènes par voie sexuée. Après doublement chromosomique du parent diploïde, des hybrides interspécifiques tétraploïdes relativement fertiles sont obtenus (Couturon, 1998).

Dans les années 1970, des hybrides 'Arabusta' ont été développés en Côte d'Ivoire. Il s'agit d'hybrides F1, fertiles, entre *C. arabica* et *C. canephora* (Capot, 1972). Ils peuvent être utilisés en tant que 'pont' pour le transfert de caractères utiles de résistance de *C. canephora* vers *C. arabica*. Si la sélection généalogique n'est pas poussée trop loin (F3 sur la figure 25) il doit être possible de récupérer une partie de leur très forte vigueur hybride (assimilée à de la 'luxuriance') et leur adaptation à de plus fortes températures par des croisements avec des 'sauvages' suivi d'une sortie clonale.

Les autres géniteurs disponibles immédiatement sont les 'hybrides naturels' de Nouvelle Calédonie, identifiés dans des plantations naturelles et qui dérivent de nombreux croisements impliquant des génotypes de *C. canephora* contrastés (Mahé, 2007). Ces hybrides naturels montrent un bon niveau de résistance à la rouille et présentent beaucoup plus de fragments introgressés que les lignées dérivées de l'Hybride de Timor.

Le séquençage du génome (Lashermes *et al.* 2010) ouvre la voie à la découverte massive de plusieurs milliers de marqueurs SSR et surtout SNP. De très nombreux marqueurs distribués sur tout le génome ont d'ores et déjà été identifiés (Crouzillat *et al.* 2010). Ils sont utilisables pour orienter les croisements. Parallèlement les techniques de phénotypage à haut-débit comme le NIRS ou de nouvelles techniques de 'Metabolomics' pour l'identification de composés biochimiques sont de plus en plus accessibles et simples d'utilisation (Posada *et al.*, 2009). Le nombre de marqueurs biochimiques ou liés à l'ADN (i.e. ARN) n'est donc plus une limite. L'utilisation de ces marqueurs pourra se faire au travers de différentes approches. Une nouvelle approche est proposée. Il s'agit de la Genome Wide Selection (Meuwissen *et al.*, 2001). Cette méthode repose sur un marquage dense du génome et prédit la valeur génétique en utilisant tous les marqueurs alors que dans la SAM conventionnelle, la sélection est basée seulement sur un petit nombre de marqueurs significativement associés avec le caractère cible. Un programme de recherche sur la Genome Wide Selection doit démarrer dans notre équipe à partir de 2011 (Montagnon C ; équipe DIVA, UMR RPB).

E. Akhunov, un professeur de la Kansas State University, développe actuellement un projet portant sur plus de 50,000-SNP chez le blé destinés à une puce (SNP-chips Illumina) qui sera utilisée pour 'génotyper' plus de 9000 lignées de blé. Le même type de projet peut être envisagé chez *Canephora*, espèce pour laquelle la diversité est importante, et qui sert de sources d'introgession à l'amélioration de l'Arabica, mais également chez les hybrides interspécifiques pour mieux maîtriser l'introgession.



**Figure 25:** Perspectives à long terme pour l'utilisation de nouvelles sources de résistance en vue de l'introgression de gènes de résistance pour le développement de variétés porte-greffes et de lignées parentales.

## FINANCER LES PROGRAMMES DE RECHERCHE

La principale contrainte de ce programme est liée à son coût (notamment le coût du phénotypage) et à sa durée. Pour la partie aérienne, la durée est variable selon que l'on voudra créer des clones d'hybrides ou des hybrides sous forme de semences qui demandent des lignées bien fixées.

Nous pensons que la commercialisation des nouvelles semences F1 sera en mesure d'ouvrir une véritable industrie semencière qui pourra porter ce type d'investissement relativement coûteux. Nous avons proposé un partenariat privé/public qui devrait pouvoir dégager assez rapidement les ressources nécessaires pour investir massivement dans une recherche de haut-niveau dans les activités de sélection.

## PREAMBULE AU PROJET DE RECHERCHE

Ce dossier de candidature à l'HDR est justifié par les travaux développés dans la thèse de A Bardil que je co-encadre. J'ai voulu en faire brièvement mention ici car les questions, les méthodologies et les outils développés dans ce travail de thèse sont applicables à mon projet de recherche à partir de 2012.

Les travaux développés par A Bardil portent sur la régulation génétique chez un allopolyploïde (*C. arabica*) par rapport à ces deux parents (*C. Canephora* et *C. eugenioides*). Rappelons brièvement que *Canephora* est une espèce qui pousse mieux aux températures plus chaudes alors qu'*Eugenioides* est plutôt mieux adapté aux régions montagneuses fraîches (Figure 6).

Selon Ni *et al.*, 2009, les variations phénotypiques importantes et parfois une vigueur végétative accrue observées chez l'allopolyploïde proviennent de l'hétérozygotie et de nouvelles interactions génomiques entre les deux sous-génomes divergents. Au travers d'études transcriptomiques massives, plusieurs auteurs ont montré une proportion variable mais toujours importante d'expression non-additive chez l'allopolyploïde par rapport aux deux parents (Rapp *et al.*, 2009 ; Wang *et al.*, 2006). Le niveau d'expression d'un gène chez l'allopolyploïde n'est pas égal à la somme des deux loci parentaux ( $1 + 1 \neq 2$ ).

A partir d'une puce à ADN (15 000 unigenes) que nous avons développée (Privat *et al.*, 2011) nous avons pu mettre en évidence (Bardil *et al.*, 2011) une forte proportion de dominance entre *Arabica* et ses deux parents pour une condition de température (22-26°C) (Figure 27). De façon inattendue nous montrons que cette relation de dominance s'estompe entre *Arabica* et *Robusta* lorsque la température augmente (Figure 27). Ce résultat est original et n'avait jamais été démontré à grande échelle chez une espèce allopolyploïde. Nous pensons que ce phénomène pourrait être à la base d'une plasticité phénotypique accrue chez l'allopolyploïde qui lui conférerait un avantage évolutif sur le temps long..

Pour illustrer cette meilleure plasticité phénotypique, nous nous sommes intéressés aux variations de la composition en acides gras des feuilles chez l'allopolyploïde et chez ses deux parents dans une gamme de température élargie. Dans les feuilles des trois espèces nous avons déterminé 7 acides gras. Parmi ceux-ci le palmitique et le linoléique sont très

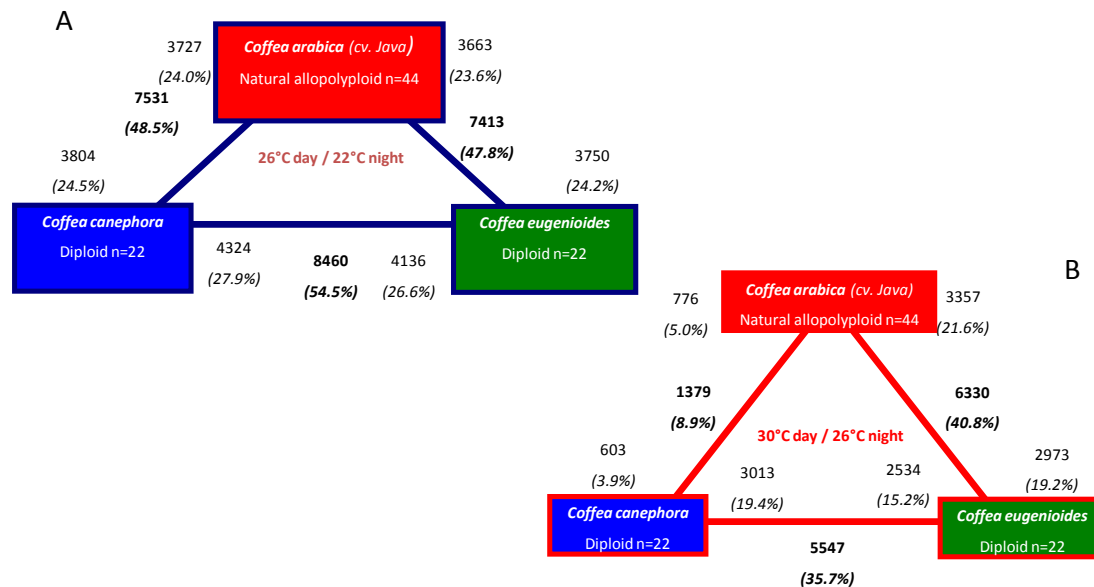
majoritaires (>70%). Le profil de l'Arabica apparaît similaire à celui de *Eugenioides* aux températures les plus fraîches et similaire à celui de *Canephora* aux températures les plus chaudes. Au cours de cette même étude, nous montrons que la biomasse des plantules de l'allopolyploïde est à peu près constante quelle que soit la température (18°C à 33°C), alors qu'elle diminue très fortement pour le *C. canephora* à la température de croissance la plus froide, et pour *C. eugenioides* à la température la plus chaude.

Ces deux résultats interprétés conjointement démontre une capacité de l'allopolyploïde à modifier avec plus d'amplitude que ses deux parents sa composition en acides gras ce qui confirmerait sa plus grande plasticité phénotypique qui à son tour participe de la plus grande homéostasie de l'Arabica en comparaison de ses deux parents.

Les questions soulevées dans le travail de thèse de A. Bardil sur l'allopolyploïdie sont similaires à celles posées par l'hétérosis. D'ailleurs dans certains travaux, l'allopolyploïdie et l'hétérosis sont étudiés en même temps car les auteurs suggèrent des bases de mécanismes similaires, (Ni *et al.* 2009).

Les plantes allopolyploïdes, souvent autogames, sont moins sensibles à la consanguinité et manifestent moins d'hétérosis, car la duplication de leur génome a permis de fixer une part importante de l'hétérosis : des effets de dominance, liés à l'état hétérozygote sont transformés en effets d'épistasie fixés à l'état homozygote (Gallais, 2009). Pour l'Arabica nous nous trouvons de façon surprenante face à un modèle biologique très intéressant qui manifeste de 'l'hétérosis fixé' au travers de l'allopolyploïde et de l'hétérosis non fixé que nous avons révélé par nos travaux antérieurs.

Alors qu'une partie de notre équipe poursuivra les travaux sur l'allopolyploïdie, nous pensons que la question biologique qui porte sur les bases génétiques et moléculaires de l'hétérosis est fondamentale et que le caféier constitue un modèle intéressant et original pour essayer d'y répondre. Compte tenu de l'importance de la vigueur hybride en terme économique chez l'Arabica, nous considérons que cela justifie d'en éclaircir les bases moléculaires et génétiques et de trouver des méthodes de prédiction de l'hétérosis.



**Fig. 27 Transcriptome divergence and non-additive gene expression between *C. arabica* cv. Java and parental diploid species.**

Bold text indicates the total number and fraction of unigenes that were defined as differentially expressed between each comparison. Non-bold text indicates the total number and fraction of unigenes that were in the up-regulation direction. For example, at 26-22°C, 7531 unigenes (48.5%) were indicated as being differentially expressed between *C. canephora* and the natural allopolyploid *C. arabica*. Of these, 3727 unigenes (24%) were up-regulated in the allopolyploid, and 3804 unigenes (24.5%) were up-regulated in *C. canephora*. **A.** *C. canephora* and *C. eugenioides* are compared to the allopolyploid *C. arabica* cv. Java at 26-22°C. Around 54.5% of the 15522 unigenes were differentially expressed between diploids, 48.5% between *C. canephora* and the allopolyploid and 47.8% between the allopolyploid and *C. eugenioides*. **B.** *C. canephora* and *C. eugenioides* are compared to the allopolyploid *C. arabica* cv. Java at 30-26°C. Around 35.7% of the 15522 unigenes were differentially expressed between diploids, 8.9% between *C. canephora* and the allopolyploid and 40.8% between the allopolyploid and *C. eugenioides*. Tiré de Bardil et al., 2011 (*New Phytol. accepté*). Aux températures les plus chaudes on constate que l'importante divergence d'expression constatée à la température la plus froide entre *C. arabica* et *C. canephora*, s'estompe.

Le changement climatique dans la ceinture intertropicale devrait avoir des effets majeurs qui se traduiront par des amplitudes plus fortes des températures et par des variations plus importantes des régimes pluviaux (Dai, 2002). Concernant le caféier on craint notamment des excès de température et/ou des successions rapides d'années sèches ou trop pluvieuses, (Delgado *et al.*; 2004). Les zones les plus fragiles seront celles pour lesquelles l'eau est une ressource déjà rare ou celles pour lesquelles les températures moyennes sont déjà élevées. Pour continuer à cultiver le caféier arabica aux altitudes (et latitudes) actuelles, nous savons qu'il faudra inéluctablement revenir à court terme vers des systèmes agroforestiers, car ce sont les seuls capables de tamponner les stress thermiques. Or le retour vers les SAF se traduira par une perte de productivité importante (estimée à -30% par Vaast *et al.*, 2006). Nous avons montré que l'amélioration variétale basée sur la voie hybride est en mesure de compenser une partie, voire la totalité des baisses de productivité provoquée par l'agroforesterie (Bertrand *et al.* 2011) car l'hétérosis augmente l'homéostasie de la plante face aux stress environnementaux. Du fait de leur vigueur, les variétés hybrides résistent en général mieux à un stress hydrique ou thermique (en fait elles récupèrent mieux après un stress), et elles manifestent une supériorité plus marquée en milieu défavorable qu'en milieu favorable. Enfin, elles sont un moyen de réunir rapidement dans un même génotype divers gènes dominants d'adaptation au milieu. Le développement de variétés hybrides de caféier d'Arabica apparaît donc comme une réponse viable pour construire une agriculture écologiquement intensive.

Cependant peu de choses sont connues sur les mécanismes liés à l'hétérosis. L'objectif principal de notre projet de recherche est le développement des connaissances sur les bases génétiques et moléculaires de l'hétérosis. D'autre part comme nous continuons à piloter un programme de sélection en Amérique Centrale, il est important de pouvoir prédire à partir de la valeur des lignées, la performance des hybrides.

La Colombie qui est le deuxième pays producteur de café arabica au monde, du fait des changements climatiques, prévoit de revenir massivement à des systèmes agroforestiers. De ce fait elle commence à développer ses propres hybrides F1 sur le modèle proposé en

Mésoamérique. CENICAFE qui est le centre de recherches sur le café de la Federación de cafeteros de Colombie entretient avec notre équipe (équipe DIVA, UMR RPB) une relation de coopération durable. La 'Federacion' regroupe plus de 250 000 producteurs de café (essentiellement des petits producteurs). Nous avons choisi de travailler avec les chercheurs de CENICAFE sur un dispositif qui devrait permettre de répondre à plusieurs questions scientifiques de pointe tout en permettant d'ouvrir sur une valorisation directe des hybrides en SAF dans ce pays. Ce dispositif sera mis en œuvre par des étudiants thésards Colombiens, Français et Kenyans.

## REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

---

Malgré son importance, on connaît peu de choses sur les bases génétiques et moléculaires de l'hétérosis alors qu'il s'agit d'un phénomène très largement exploité dans beaucoup d'espèces. Chez les plantes allogames, une grande partie de l'hétérosis peut s'expliquer comme le phénomène complémentaire de la dépression de consanguinité. Chez les autogames l'hétérosis est beaucoup plus difficile à mettre en évidence. En effet on admet généralement qu'au cours de l'évolution le fardeau génétique tend à diminuer et de ce fait il est couramment admis que la plante autogame a fixé une partie de l'hétérosis. De façon surprenante nous avons montré un hétérosis important chez l'Arabica, alors qu'il s'agit d'une espèce autogame et de surcroît allopolyploïde.

Les nouveaux outils de la génomique permettent aujourd'hui d'envisager des études massives ou fines de l'hétérosis à l'échelle de l'expression génique. Plusieurs chercheurs travaillent sur ce phénomène chez *Arabidopsis* (Wang *et al.*, 2006), Maïs (Swanson-Wagner *et al.*, 2006), riz (Song *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2010; Wei *et al.*, 2009), et *Medicago sativa* (Li *et al.*, 2009) par des techniques de séquençage du transcriptome à haut-débit. Ces études montrent une forte proportion d'expression non-additive.

Il a été rapporté que des variations alléliques dans l'expression de gènes peuvent avoir un impact sur la vigueur hybride chez le maïs (Guo *et al.*, 2004; Springer and Stupar, 2007). Plusieurs associations potentielles entre des expressions différentielles de gènes particuliers



et l'hétérosis ont été suggérées. Par exemple, des gènes différentiellement exprimés impliqués dans l'assimilation du CO<sub>2</sub> (Bao *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2002) et le métabolisme énergétique (Wei *et al.*, 2009) pourraient être reliées à de meilleures performances des hybrides chez le riz. Ni *et al.*, 2009 ont suggéré que les gènes impliqués dans le rythme circadien tels que LHY et CCA1, tous deux des facteurs de transcription 'MYB-like', sont associés avec l'hétérosis chez *Arabidopsis*.

Finalement des modifications épigénétiques et de petits RNA –impliqués dans la régulation génétique seraient aussi reliés à l'hétérosis (Ha *et al.*, 2009; He *et al.*, 2010).

Springer et Stupar (2007) ont suggéré que des modifications globales du niveau d'expression génétique chez les hybrides pouvaient expliquer leurs meilleures performances. Récemment Frish *et al.*, 2010 ont montré que les analyses massives du transcriptome peuvent être utilisées pour prédire la performance des hybrides. Ces auteurs ont défini des mesures de distance euclidiennes entre lignées parentales à partir des données de l'expression des gènes. Ils ont pu montrer que ces distances étaient beaucoup plus efficaces que celles basées sur des marqueurs moléculaires .

## QUESTIONS DE RECHERCHES

---

Les objectifs de ce projet de recherche sont de comprendre et de prédire l'hétérosis et de comprendre comment et pourquoi les hybrides s'adaptent mieux que des lignées homozygotes à des environnements plus chauds.

Nous faisons l'hypothèse i) que les relations d'additivité/dominance et de super-dominance au niveau des gènes évoluent en fonction du milieu. Ce serait les variations de ces relations qui expliqueraient la meilleure adaptabilité (homéostasie) des hybrides aux différents environnements ii) que des modifications engendrées par l'hétérosis ont une base génétique réduite et sont basées sur un nombre limité de voie de biosynthèse; iii) que l'hétérosis peut être prédite par les distances calculées sur les transcriptomes des lignées parentales.

Nous déclinerons nos travaux en plusieurs sous-questions :

- A) les meilleures performances des hybrides sont-elles dues globalement à une super-dominance ( $1+1 > 2$ ) ou plus simplement à une dominance à plusieurs loci ? La dominance et la super-dominance varient-elles en fonction du milieu comme nos travaux l'ont montré chez l'allopolyploïde arabica par rapport à ses deux parents diploïdes.
- B) Comment la supériorité des hybrides se traduit-elle au niveau phénotypique? L'hétérosis se traduit-il par une meilleure plasticité phénotypique pour la modification de la composition en acides gras des phospholipides des parois cellulaires dans le contexte de brusques changements de température comme nos travaux le démontre dans le cas d'allopolyploïdes et de leurs parents diploïdes (Travaux en cours Bardil et Bertrand)?
- C) Peut-on détecter des gènes de l'hétérosis ? Par exemple, la fixation de CO<sub>2</sub> est-elle supérieure chez les hybrides par rapport aux lignées comme cela a été montré chez le riz ?
- D) Peut-on prédire la performance des hybrides en se basant sur des distances calculées sur le transcriptome afin d'améliorer l'efficacité de la sélection. Nous suivrons les méthodologies décrites récemment chez le maïs (Frisch *et al.* 2010) basées sur des distances calculées sur le transcriptome qui se sont avérées plus puissantes que celles basées sur des marqueurs liés à l'ADN.

Pour répondre à ces questions, nous avons mis en place avec nos partenaires Colombiens un plan factoriel *cultivés x 'sauvages'* (3 x 10) qui a été déployé dans trois sites d'écologie contrastée. Sur chaque site nous testons deux conditions d'ombrage (i.e ; plein-soleil vs 50% de luminosité).

A partir de ce dispositif on fera des mesures des performances des hybrides et de leurs parents pour la croissance végétative, la production et différents métabolites (lipides et acides gras des feuilles, activité photosynthétique, etc..). Les séquençages du transcriptome et les études métabolomiques seront faites à partir d'échantillons des 3 sites et des deux conditions d'ombrage.

## LISTE DES 10 ARTICLES LES PLUS IMPORTANTS

- Bardil A, Dantas de Almeida J, Combes MC, Lashermes P, Bertrand B. 2011.** Genomic expression dominance in the natural allopolyploid *Coffea arabica* is massively affected by growth temperature. *New Phytologist*, in press
- Bertrand B, Alpizar E, Lara L, SantaCreo R, Hidalgo M, Quijano J.M., Montagnon C, Georget F, Etienne H. 2011.** Performance of *Coffea arabica* F1 hybrids in agroforestry and full-sun cropping systems in comparison with American pure line cultivars. *Euphytica*, DOI 10.1007/s10681-011-0372-7
- Privat I., Bardil A., Bombarely Gomez A., Severac D., Dantec C., Fuentes I., Mueller L., Joët T., Pot D., Foucrier S., Dussert S., Leroy T., Journot L., De Kochko A., Campa C., Combes M.C., Lashermes P., Bertrand B. 2011.** The 'PUCE CAFE' project: The first 15K coffee microarray, a new tool for discovering candidate genes correlated to agronomic and quality traits. *BMC Genomics*, **12** (5).[20110207]. <http://dx.doi.org/10.1186/1471-2164-12-5>
- Joët T., Laffargue A., Salmona J., Doulebeu S., Descroix F., Bertrand B., De Kochko A., Dussert S. 2009.** Metabolic pathways in tropical dicotyledonous albuminous seeds : *Coffea arabica* as a case study. *New phytologist*, 182 : 146-162.[20090402]. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02742.x>
- Posada H., Ferrand M., Davrieux F., Lashermes P., Bertrand B. 2009.** Stability across environments of the coffee variety near infrared spectral signature. *Heredity*, 102 (2) : 113-119.[20090323]. <http://www.nature.com/hdy/journal/v102/n2/pdf/hdy200888a.pdf>
- Labouisse J.P., Bellachew B., Kotecha S., Bertrand B. 2008.** Current status of coffee (*Coffea arabica* L.) genetic resources in Ethiopia : Implications for conservation. *Genetic resources and crop evolution*, 55 (7) : 1079-1093.[20081020]. <http://dx.doi.org/10.1007/s10722-008-9361-7>
- Bertrand B., Etienne H., Cilas C., Charrier A., Baradat P. 2005.** *Coffea arabica* hybrid performance for yield, fertility and bean weight. *Euphytica*, 141 (3) : 255-262. <http://dx.doi.org/10.1007/s10681-005-7681-7>
- Bertrand B., Guyot B., Anthony F., Lashermes P. 2003.** Impact of the *Coffea canephora* gene introgression on beverage quality of *C. arabica*. *Theoretical and applied genetics*, 107 : 387-394. <http://dx.doi.org/10.1007/s00122-003-1203-6>
- Etienne H., Bertrand B. 2003.** Somaclonal variation in *Coffea arabica*: effects of genotype and embryogenic cell suspension age on frequency and phenotype of variants. *Tree physiology*, 23 (6) : 419-426.
- Bertrand B., Anthony F., Lashermes P. 2001.** Breeding for resistance to *Meloidogyne exigua* in *Coffea arabica* by introgression of resistance genes of *Coffea canephora*. *Plant pathology*, 50 (5) : 637-643. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-3059.2001.00597.x>

## BIBLIOGRAPHIE DU MEMOIRE

- Alpizar E., Etienne H., Bertrand B. 2007. Intermediate resistance to *Meloidogyne exigua* root-knot nematode in *Coffea arabica*. *Crop Protection*, 26 (7) : 903-910.
- Anthony F, Berthaud J, Guillaumet JL, Lourd M. 1987. Collecting wild *Coffea* species in Kenya and Tanzania. *Plant Genet Resour News* 1 69:23–29
- Anthony F, Bertrand B, Quiros O. 2001. Genetic diversity of wild coffee (*Coffea arabica* L.) using molecular markers. *Euphytica* 118:53-65
- Anthony F., Combes M.C., Astorga C., Bertrand B., Graziosi G., Lashermes P. 2002a. The origin of cultivated *Coffea arabica* L. varieties revealed by AFLP and SSR markers. *Theor. Appl. Genet.* 104, 894–900.
- Anthony F., Quiros O., Topart P., Bertrand B., Lashermes P. 2002b. Detection by simple sequence repeat markers of introgression from *Coffea canephora* in *Coffea arabica* cultivars. *Plant breeding*, **121** (6) : 542-544. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1439-0523.2002.00748.x>
- Anthony F., Dussert S., Dulloo M.E. 2007 Coffee genetic resources. In: Engelmann F, Dulloo M E, Astorga C et al (eds) Conserving coffee genetic resources. Bioversity International, Rome, pp 12-22
- Anzueto F. 1993. Etude de la résistance du caféier (*Coffea* spp) à *Meloidogyne* sp et *Pratylenchus* sp. Thèse de doctorat, Rennes, France, ENSAR, 123 p.
- Bao J., et al. 2005. Serial analysis of gene expression study of a hybrid rice strain (LYP9) and its parental cultivars. *Plant Physiol.* 138, 1216–1231.
- Bardil A., Dantas de Almeida J., Combes M.C., Lashermes P., Bertrand B. 2011. Genomic expression dominance in the natural allopolyploid *Coffea arabica* is massively affected by growth temperature. *New Phytologist*, in press
- Bellachew B. 1997. Arabica coffee breeding in Ethiopia: a review. In: 17th International Coffee Science Conference, ASIC, Nairobi, Kenya, 20-25 July 1997, pp 406-414
- Bertrand B., Nunez C., Sarah J.L. 2000a. Disease complex in coffee involving *Meloidogyne arabicida* and *Fusarium oxysporum*. *Plant Pathology*, 49 (4) : 383-388. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-3059.2000.00456.x>
- Bertrand B., Pena Duran M.X., Anzueto F., Cilas C., Etienne H., Anthony F., Eskes A. 2000b. Genetic study of *Coffea canephora* coffee tree resistance to *Meloidogyne incognita* nematodes in Guatemala and *Meloidogyne* sp. nematodes in El Salvador for selection of rootstock varieties in Central America. *Euphytica*, **113** (2) : 79-86. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1003931918187>
- Bertrand B., Anthony F., Lashermes P. 2001a. Breeding for resistance to *Meloidogyne exigua* in *Coffea arabica* by introgression of resistance genes of *Coffea canephora*. *Plant pathology*, **50** (5) : 637-643. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-3059.2001.00597.x>
- Bertrand B., Etienne H., Eskes A. 2001b. Growth, production and bean quality of *Coffea arabica* as affected by Interspecific Grafting: consequences for rootstock breeding. *Hort. Sci.* 36: 269-273.
- Bertrand B., Ramirez G., Topart P., Anthony F. 2002. Resistance of cultivated coffee (*Coffea arabica* and *C. canephora*) trees to corky-root caused by *Meloidogyne arabicida* and *Fusarium oxysporum*, under controlled and field conditions. *Crop Protection*, **21** (1) : 713-719. [http://dx.doi.org/10.1016/S0261-2194\(02\)00028-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0261-2194(02)00028-5)

- Bertrand B., Guyot B., Anthony F., Lashermes P. 2003 Impact of *Coffea canephora* gene introgression on beverage quality of *C. arabica*. *Theor. Appl. Genet.* 107, 387–394.
- Bertrand B., Etienne H., Cilas C., Charrier A., Baradat P. 2005a. *Coffea arabica* hybrid performance for yield, fertility and bean weight. *Euphytica* 141, 255–262.
- Bertrand B., Etienne H., Lashermes P., Guyot B., Davrieux F. 2005b. Can near-infrared reflectance of green coffee be used to detect introgression in *Coffea arabica* cultivars?. *Journal of the science of food and agriculture*, **85** (6) : 955-962.
- Bertrand B., Vaast P., Alpizar E., Etienne H., Davrieux F., Charmetant P. 2006a. Comparison of bean biochemical composition and beverage quality of Arabica hybrids involving Sudanese-Ethiopian origins with traditional varieties at various elevations in Central America. *Tree Physiology* 26, 1239–1248.
- Bertrand B., Etienne H., Davrieux F., Guyot B. 2006b. Central America and the Caribbean, breeding for quality. In : Montagnon Christophe (ed.). *Coffee: terroirs and qualities*. Versailles : Ed. Quae, p. 147-161.
- Bertrand B., Anthony F. 2008a. Genetics of resistance to root-knot nematodes (*Meloidogyne* spp.) and breeding. In : Souza Ricardo M. (ed.). *Plant-parasitic nematodes of coffee*. Berlin : Springer [Allemagne], p. 165-190. [http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-8720-2\\_9](http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-8720-2_9)
- Bertrand B., Villarreal D., Laffargue A., Posada H., Lashermes P., Dussert S. 2008b. Comparison of the effectiveness of fatty acids, chlorogenic acids, and elements for the chemometric discrimination of coffee (*Coffea arabica* L.) varieties and growing origins. *Journal of agricultural and food chemistry*, **56** (6) : 2273-2280.
- Bertrand B., Alpizar E., Lara L., SantaCreo R., Hidalgo M., Quijano J.M., Montagnon C., Georget F., Etienne H. 2011. Performance of *Coffea arabica* F1 hybrids in agroforestry and full-sun cropping systems in comparison with American pure line cultivars. *Euphytica*, DOI 10.1007/s10681-011-0372-7
- Bettencourt A. 1973 Considerações gerais sobre o ‘Híbrido de Timor’. *Circular n°31* of Instituto Agronomico de Campinas, 256 p.
- Capot J. 1972. L’amélioration du caféier en Côte-d’Ivoire. Les hybrides ‘Arabusta’. *Café Cacao Thé*. 16 :3
- Carvalho A., Monaco L.C. 1969 The breeding of Arabica coffee, pp. 198–216. In: Outlines of perennial crop breeding in the tropics (F.P. Fewerda and F. Wit, Eds.), *Misc. Pap. Agric. Univ. Wageningen*.
- Castillo Z. 1990 Mejoramiento genetico del café en Colombia, pp. 46–53. In Centro Nacional de Investigaciones de Café CENICAFE (Ed.) 50 años de Cenicafe, 1938–1988. *Conferencias conmemorativas*, Chinchina Colombia.
- Cenci A., Combes M.C., Lashermes P: 2010. Comparative sequence analyses indicate that *Coffea* (Asterids) and *Vitis* (Rosids) derive from the same paleo-hexaploid ancestral genome. *Molecular Genetics and Genomics*, 283: 493–501.
- Charrier A. 1978 Etude de la structure et de la variabilité génétique des caféiers. *Bull. IFCC* 14, 1–100.
- Charrier A. 1985. Progrès et perspectives de l’amélioration génétique des caféiers. In colloque Scientifique sur le café. Lomé, Togo. Proc.ASIC, Vevey, Suisse, p. 403-425.
- Charrier A., Eskes A. B. 2004. Botany and genetics of coffee. In: Wintgens J N (ed) *Coffee: Growing, processing, sustainable production. A guide book for growers, processors traders and researchers*. Wiley-VCH, Weinheim

- Crouzillat D., Rigoureau M., Lefebvre-Pautigny F., Priyono X., Broun P., Lambot C., 2010. A Coffee High Density Genetic Map for Quantitative Trait Loci Analysis on Agronomical, Technological and Biochemical Characteristics in Robusta and Arabica. In : *23rd International Conference on Coffee Science*. [Cd-Rom]. ASIC, International Conference on Coffee Science. 397-404. 2010-10-03/2010-10-08 Bali, Indonesia.
- Dai A. 2010. Drought under global warming: a review. *Climate Change*. 2:45-65. DOI: 10.1002/wcc.81
- Delgado A., Pinto H.S., Zullo J., Helminsk A.M. 2004. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, 39:11,1057-1064.
- Daviron B., Ponte S. 2005. *The Coffee Paradox: Global Markets, Commodity Trade and the Elusive Promise of Development*. Londres, Zed Books. 288 p.
- Eira M.T.S., Silva E.A.A., Castro R.D., Dussert S., Walters C., Bewley J.D., Hilhorst H.W.M.. 2006. Coffee seed physiology. *Brazil. J. Plant Physiol.* 18:149–163.
- Eskes A. 1989. Identification, Description and Collection of Coffee Types in PDR Yemen. Rapport de mission interne du CIRAD, Mai 1989, 35 p.
- Falconer D.S. 1981. *Introduction to quantitative genetics*. 2<sup>nd</sup> ed., Longman, London. 340p.
- Fisher R.A. 1930. *The genetical theory of natural selection*. Clarendon Press, Oxford, 120p.
- Frisch M., Thiemann A., Fu J., Schrag T., Scholten S., Melchinger A. 2010. Transcriptome-based distance measures for grouping of germplasm and prediction of hybrid performance in maize. *Theor. Appl. Genet.*, 120:411-450.
- Gallais A. 1990. *Théorie de la sélection en amélioration des plantes*. Masson Publisher, France, 588 p.
- Gallais A. 2009. Hétérosis et variétés hybrides en amélioration des Plantes. Synthèses. Eds Quae, INRA, Versailles, France, 356 p.
- Gichuru E.K., Agwanda C.O., Combes M.C., Mutitu E.W., Ngugi E.C.K., Bertrand B., Lashermes P. 2008. Identification of molecular markers linked to a gene conferring resistance to coffee berry disease (*Colletotrichum kahawae*) in *Coffea arabica*. *Plant pathology*, 57 (6) : 1117-1124.
- Grassias M. 1980. Etude de la fertilité et du comportement méiotique des hybrides interspécifiques Arabusta *Coffea arabica* x *C. canephora*.. Thèse Université Paris-XI (Orsay), France.
- Guillaumet J. L., Hallé F. 1967. Etude de la variabilité du *Coffea arabica* dans son aire d'origine. Rapport sur la mission ORSTOM dans le Sud-Ouest de l'Ethiopie. 12 novembre-18 décembre 1966. Adiopodoumé, Côte d'Ivoire, ORSTOM.
- Giovanucci D., Liu P., Byers A. 2008. Adding value: Certified coffee trade in North America. In: P. Liu (Ed) *Value-adding standards in the North American Food Market – Trade opportunities in Certified products for Developing Countries*. FAO, Rome, 33-49.
- Gonçalves W., Pereira A.A. 1998. Resistência do cafeeiro a nematóides. IV. Reação de cafeeiros derivados do Híbrido de Timor a *Meloidogyne exigua*. *Nematologia Brasileira* 22, 39–50.
- Guo M., Rupe M.A., Zinselmeier C., Habben J., Bowen B.A., Smith O.S. 2004. Allelic variation of gene expression in maize hybrids. *Plant Cell*. 16, 1707–1716.

- Guerrero Filho O., Silvarolla M.B., Eskes A.B. 1999. Expression and mode of inheritance of resistance in coffee to leaf miner *Perileucoptera coffeella*. *Euphytica* 105, 7–15.
- Griffon M. 2010. Pour des agricultures écologiquement intensives : des territoires à haute valeur environnementale et de nouvelles politiques agricoles. La Tour d'Aigues : Ed. de l'Aube, 143 p.
- Ha M., et al. 2009. Small RNAs serve as a genetic buffer against genomic shock in Arabidopsis interspecific hybrids and allopolyploids. *Proc. Natl Acad. Sci. U S A.* 106, 17835–17840.
- He G. et al. 2010. Global epigenetic and transcriptional trends among two rice subspecies and their reciprocal hybrids. *Plant Cell.* 22, 17–33.
- Hoecker N. Keller B. P., Phiepo P., Holchholdinger F. 2006. Manifestation of heterosis during early maize root development. *Theor. Appl. Genet.* 12, 421–429.
- Hoecker N., Keller B., Muthreich N., Chollet D., Descombes P., Phiepo P., Holchholdinger F. 2008. Comparison of maize F1 hybrid and parental inbred line primary root transcriptomes suggests organ-specific patterns of non additive gene expression and conserved expression trends. *Genetics* 179, 1275–1283.
- Krug C.A., Mendes J.E.T. 1940. Cytological observations in *Coffea*. *J. Genet.* 39, 189–203.
- Krug C.A., Mendes, J.E.T., Carvalho A. 1939. Taxonomia de *Coffea arabica* L. Campinas: Instituto Agronomico do Estado, *Boletim Tecnico* n°62.
- Kushalappa A.C., Eskes A. 1989. Coffee Rust: Epidemiology, Resistance, and Management. Florida, CRC Press, 345 p.
- Labouisse J.P., Bellachew B., Kotecha S., Bertrand B. 2008. Current status of coffee (*Coffea arabica* L.) genetic resources in Ethiopia : Implications for conservation. *Genetic resources and crop evolution*, 55 (7) : 1079–1093.[20081020]. <http://dx.doi.org/10.1007/s10722-008-9361-7>
- Lashermes P., Combes M.C., Robert J., Trouslot P., D'Hont A., Anthony F., Charrier A. 1999. Molecular characterisation and origin of the *Coffea arabica* L. genome. *Mol. Gen. Genet.* 261, 259–266.
- Lashermes P., Andrzejewski S., Bertrand B., Combes M.C., Dussert S., Graziosi G., Trouslot P., Anthony F. 2000. Molecular analysis of introgressive breeding in coffee (*Coffea arabica* L.). *Theor. Appl. Genet.* 100, 139–146.
- Lashermes P., Argout Y., Crouzillat D., Priyono, Yepes M., Wincker P. 2010. Sequencing the Coffee Genome: Overall Strategy and Progress Made in the Frame of ICGN. In : *23rd International Conference on Coffee Science*. [Cd-Rom]. ASIC, International Conference on Coffee Science. 397–404. 2010-10-03/2010-10-08 Bali, Indonésie.
- Lashermes P., Combes M.C., Ribas A., Cenci A., Mahé L., Etienne H: 2011. Genetic and physical mapping of the SH3 region that confers resistance to leaf rust in coffee tree (*Coffea arabica* L.). *Tree Genetics and Genomes*.
- Lefort-Buson M., Dattée Y. 1985. Etude de l'hétérosis chez le colza oléagineux d'hiver (*Brassica napus* L.) – Comparaison de deux populations l'une homozygote et l'autre hétérozygote, *Agronomie* 5: 101–110.
- Li X., Wei Y., Nettleton D., Brumme E.C. 2009. Comparative gene expression profiles between heterotic and non-heterotic hybrids of tetraploid *Medicago sativa*. *BMC Plant Biol.* 9, 107.
- Louarn J. 1992. La fertilité des hybrides interspécifiques et les relations génomiques entre caféiers diploïdes d'origine africaine (Genre *Coffea*, sous-genre *Coffea* L.). Thèse d'Etat, Paris XI (Orsay), 200 p.
- Mahé L., Várzea V.M.P., Le Pierrès D., Combes M.C., Lashermes P. 2007. A new source of resistance against coffee leaf rust from New-Caledonian natural interspecific hybrids between *Coffea arabica* and *C. canephora*. *Plant Breeding* 126: 638–641.

Meuwissen T., Goddard M. 2010. Accurate prediction of genetic values for complex traits by whole genome resequencing. *Genetics*. 10.1534/genetics.110.116590

Montagnon C., Marraccini P., Bertrand B. 2011. Breeding for coffee quality. In Specialty Coffee, Managing quality, Edited by T Obertür, P Laderäch, H.A. Pohlen and J Cook. *en cours d'édition*.

Meyer F. G. 1965. Notes on wild *Coffea arabica* from southwestern Ethiopia, with some historical considerations. *Econ Bot* 19(2):136-151

Meyer F G, Fernie L.M., Narasimhaswamy R.L. 1968. FAO coffee mission to Ethiopia 1964-1965. FAO, Rome

Montagnon C., Bouharmont P. 1996. Multivariate analysis of phenotype diversity of *Coffea arabica*. *Genet Resour Crop Ev* 43(3):221-227

Moreno Ruiz G. 1989. Etude du polymorphisme de l'Hybride de Timor en vue de l'amélioration du caféier Arabica. Thèse de Doctorat, Ecole Supérieure Agronomique de Montpellier, 153 p.

Ni Z., Kim E.D., Ha M., Lackey E., Liu J., Zhang Y., Sun Q., Chen Z.J. 2009: Altered circadian rhythms regulate growth vigour in hybrids and allopolyploids. *Nature*, 457:327–331.

Noir S., Anthony F., Bertrand B., Combes M.C., Lashermes P. 2003. Identification of a major gene (*Mex-1*) from *Coffea canephora* conferring resistance to *Meloidogyne exigua* in *Coffea arabica*. *Plant pathology*, 52 : 97-10. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-3059.2003.00795.x>

Pendergrast M. 2002. El Café : historia de la semilla que cambio el mundo, Madrid, Javier Vergara Ed., 28p.

Posada H., Ferrand M., Davrieux F., Lashermes P., Bertrand B. 2009. Stability across environments of the coffee variety near infrared spectral signature. *Heredity*, 102 (2) : 113-119.[20090323]. <http://www.nature.com/hdy/journal/v102/n2/pdf/hdy200888a.pdf>

Rapp R.A., Udall J.A., Wendel J.F. 2009. Genomic expression dominance in allopolyploids. *BioMed Central Biology* 7: 18.

Samper M. 1999. Trayectoria y viabilidad de las caficulturas centroamericanas. In Desafios de la caficultura centroamericana B. Bertrand, B. Rapidel, Eds. IICA, San José (Costa Rica), pp. 407–456.

Silvestrini M., Junqueira M., Favarin A. 2007. Genetic diversity and structure of Ethiopian, Yemen and Brazilian *Coffea arabica* L. accessions using microsatellites markers. *Genet Resour Crop Ev* 54(6):1367-1379

Song S., Qu H., Chen C., Hu S., Yu J. 2007. Differential gene expression in an elite hybrid rice cultivar (*Oryza sativa*, L) and its parental lines based on SAGE data. *BMC Plant Biol.* 7, 49.

Springer N.M., Stupar R.M. 2007. Allelic variation and heterosis in maize: how do two halves make more than a whole? *Genome Res.* 17, 264–275.

Sylvain P.G. 1958. Ethiopian coffee. Its significance to world coffee problems. *Econ Bot* 12:111-139.

Swanson-Wagner R.A., Jia Y., DeCook R., Borsuk L.A., Nettleton D., Schnable P.S. 2006. All possible modes of gene action are observed in a global comparison of gene expression in a maize F1 hybrid and its inbred parents. *Proc. Natl Acad.Sci. U S A.* 103, 6805–6810.

Vaast P., Bertrand B., Perriot J.J., Guyot B., Génard M. 2006. Fruit thinning and shade improve bean characteristics and beverage quality of coffee (*Coffea arabica* L.) under optimal conditions. *Journal of the science of food and agriculture*, 86 (2) : 197-204. <http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.2338>



- Van der Vossen, H.A.M. 1985. Coffee selection and breeding, pp. 46–68. *In* Coffee Botany Biochemistry and production of beans and beverage (C. Clifford and J. Wilson, Eds.), Westford, Connecticut, EE.UU.
- Van der Vossen, H.A.M. 2001 Agronomy I: Coffee breeding practices, pp. 184–201. *In* Coffee: recent developments (R.J. Clarke, O.G. Vitzthum, Eds.), Blackwell Science, United Kingdom.
- Van der Vossen, H.A.M. 2005. State-of-art of developing durable resistance to biotrophic pathogens in crop plants, such as coffee leaf rust. In Durable resistance to coffee leaf rust, *In* L. Zambolim, E.M. Zambolim, and V.M.P. Várzea, eds. (Viçosa, Universidade Federal de Viçosa), 540 p.
- Varzêa V.M.P., Marqués D.V. 2005. Population variability of *Hemileia vastatrix* vs coffee durable resistance. *In* L. Zambolim, E.M. Zambolim, and V.M.P. Várzea, eds. (Viçosa, Universidade Federal de Viçosa), 540 p.
- Villarreal D., Laffargue A., Posada H., Bertrand B., Lashermes P., Dussert S. 2009. Genotypic and environmental effects on coffee (*Coffea arabica* L.) bean fatty acid profile: Impact on variety and origin chemometric determination. *Journal of agricultural and food chemistry*, 57 (23) : 11321-11327.[20091204]. <http://dx.doi.org/10.1021/jf902441n>
- Walayaro, D.J. 1983 Considerations in breeding for improved yield and quality in Arabica coffee (*Coffea arabica* L.). Doctoral Thesis, Agricultural University, Wageningen.
- Wang Q. *et al.* 2002. Characterization of photosynthesis, photoinhibition and the activities of C(4) pathway enzymes in a superhigh-yield rice, Liangyoupeiiju. *Sci. China C. Life Sci.* 45,468–476.
- Wang L. *et al.* 2010. A dynamic gene expression atlas covering the entire life cycle of rice. *Plant J.* 61, 752–766.
- Wang, J., *et al.* 2006. Genomewide nonadditive gene regulation in Arabidopsis allotetraploids. *Genetics.* 172, 507–517.
- Wei, G., *et al.* 2009. A transcriptomic analysis of superhybrid rice LYP9 and its parents. *Proc. Natl. Acad. Sci. U S A.* 106, 7695–7701.
- Wellman F.L. 1961. Coffee: Botany, Cultivation and Utilisation, Leonard Hill, London, and Interscience Publishers, New York, 542 p.
- Wright S. 1922. The effects of inbreeding and cross-breeding on guinea pigs. III. Crosses between highly inbred families. *Bull. U.S. Dep. Agric.*, Washington, 1121.